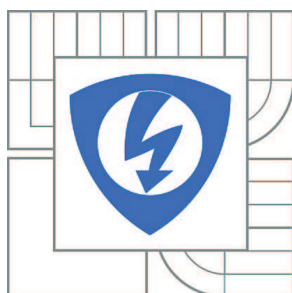


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# **OPTICKÁ KOMUNIKACE V ULTRA FIALOVÉM PÁSMU**

OPTICAL COMMUNICATION IN ULTRA VIOLET BAND

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

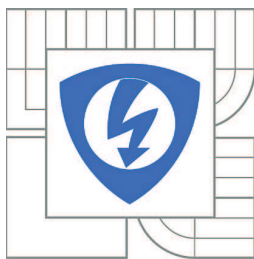
**MARTIN GOLUBEV**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. JURAJ POLIAK**

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Martin Golubev

**ID:** 125216

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

**Optická komunikace v ultra fialovém pásmu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s koncepcí optických spojů využívajících UV oblast záření (UV NLOS communication). Popište detailně interakci atmosférického přenosového prostředí s UV svazkem. Podrobně objasněte účinky UV záření na živé organismy. Navrhněte spoj UV NLOS. Popište jednotlivé komponenty komunikačního systému. Vytvořte program, který po zadání vstupních parametrů optického spoje a atmosféry vykreslí energetickou bilanci optického spoje.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MORIARTY, D., HOMBS, B. , System design of tactical communications with solar blind ultraviolet non line-of-sight systems, In Military Communications Conference MILCOM 2009, 2009, p.1-7.

[2] WANG JUNLIANG, LUO TING, DAI MENG, TIAN YANFANG, UV NLOS Communications atmospheric channel model and its performance analysis, In Computer Science and Information Engineering 2009 WRI World Congress, 2009, p.85-88.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 25.5.2012

**Vedoucí práce:** Ing. Juraj Poliak

**Konzultanti bakalářské práce:**

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

# Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou atmosférického přenosového prostředí a výkonových poměrů v ultrafialovém optickém svazku šířícím se v Zemské atmosféře. V práci jsou popsány optické jevy, jejich důsledky a využití. Popis atmosférického přenosového prostředí rozebírá vliv jednotlivých částic v atmosféře na optické svazky. Jsou popsány účinky UV záření na živé organismy. Simulace výkonových poměrů pomocí Matlabu a příklad konkrétního návrhu spoje UV NLOS na krátkou vzdálenost poslouží jako základ pro další výzkum této oblasti optických komunikací.

## Klíčová slova

Optické bezkabelové spoje, atmosférické přenosové prostředí, LED, útlum, rozptyl, absorpce, účinky na zdraví, návrh optického spoje.

# Abstract

This bachelor thesis deals with analyzing atmospheric transmission media properties and performance ratio in ultraviolet band optics beam propagating in Earth's atmosphere. In work are defined a optical phenomenons, their implications and use. Description of atmospheric transmission media analyzes the impact of individual particles in the atmosphere on optical beams. There are described a effect of ultraviolet light on living organisms. Simulations of performance ratio using Matlab and proposal of concrete link of UV NLOS for short range are serve as a basis for further research into this field of optical communications.

# Keywords

Free space optics, atmospheric transmission media, LED, attenuation, scattering, absorption, health effect, proposal of optical link

## Bibliografická citace

GOLUBEV, M. *Optická komunikace v ultra fialovém pásmu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Juraj Poliak.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Optická komunikace v ultrafialovém pásmu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce ing. Jurajovi Poliakovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# Obsah

1 Úvod.....	4
2 Optika.....	5
2.1 Geometrická optika.....	5
2.2 Vlnová optika.....	8
2.3 Elektromagnetická optika .....	10
2.4 Fotonová optika.....	11
2.5 Základní optické veličiny[4].....	12
3 Zdroje a přijímače optického výkonu.....	13
3.1 Polovodičové součástky.....	13
3.2 Lasery.....	14
3.3 Konkrétní zdroje pro UV oblast.....	15
4 Přenosové prostředí.....	16
4.1 Dualita světla.....	16
4.2 Interference.....	16
4.3 Difrakce.....	17
4.4 Disperze a absorpce.....	17
4.5 Rozptyl.....	18
5 Vliv UV záření na živé organismy .....	22
6 Návrh spoje UV NLOS.....	24
6.1 Analýza přenosového prostředí.....	24
6.2 Konkrétní návrh.....	29
7 Závěr.....	31
Literatura.....	32
Seznam symbolů.....	34
Přílohy.....	36
A Funkce pro výpočet energetické bilance UV NLOS spoje.....	36
B Skript pro vykreslení grafů závislostí útlumů.....	37
C Skript pro vykreslení výkonových poměrů ve spoji UV NLOS.....	40

### Seznam obrázků

Obrázek 1: Klasifikace přístupu k teorii optiky, převzaté z [20].....	5
Obrázek 2: Spojná čočka, převzaté z [21].....	6
Obrázek 3: Rozptylná čočka, převzaté z [21].....	6
Obrázek 4: Chromatická aberace, převzaté z [21].....	6
Obrázek 5: Zobrazení pomocí zrcadla, převzaté z [23].....	7
Obrázek 6: Dělič svazku [24].....	7
Obrázek 7: Optický hranol [25].....	7
Obrázek 8: Lom světla, převzaté z [26].....	8
Obrázek 9: Michelsonův interferometr, převzaté z [28].....	9
Obrázek 10: fotoelektrický jev [29].....	11
Obrázek 11: Led dioda, převzaté z [29].....	13
Obrázek 12: Konstrukce laseru, převzaté z [30].....	14
Obrázek 13: Koeficienty $v_0$ a $\Delta v$ , převzaté z [1].....	14
Obrázek 14: Spektrální závislost odrazivosti zrcadla NB1-K04 v rozmezí (258 - 274)nm, převzaté z [7].....	15
Obrázek 15: Youngův pokus [31].....	17
Obrázek 16: Difrakce na šterbině [32].....	17
Obrázek 17: Vliv disperzního prostředí na optický svazek.....	18
Obrázek 18: Rozdělení druhů rozptylů podle hodnoty parametru dimenze.....	19
obrázek 19: Útlum na aerosolech (1).....	20
obrázek 20: Útlum na aerosolech (2).....	21
obrázek 21: Útlum na molekulách.....	21
Obrázek 22: Účinky záření na živou tkáň, převzaté z [13].....	23
obrázek 23: Schéma spoje NLOS, převzaté z [16].....	24
obrázek 24: Útlum šířením.....	25
obrázek 25: Vysílací výkon v závislosti na vzdálenosti.....	26
obrázek 26: Vysílací výkon v závislosti na bitové rychlosti.....	26
obrázek 27: Bitová rychlost v závislosti na vysílacím výkonu.....	27
obrázek 28: přiblížení obrázku 27 pro výkony od 1mW do 10mW.....	27
obrázek 29: Přijatý výkon v závislosti na vzdálenosti.....	28
obrázek 30: Přijatý výkon v závislosti na efektivitě fotodetektoru.....	29
obrázek 31: Příklad energetické bilance optického spoje.....	30



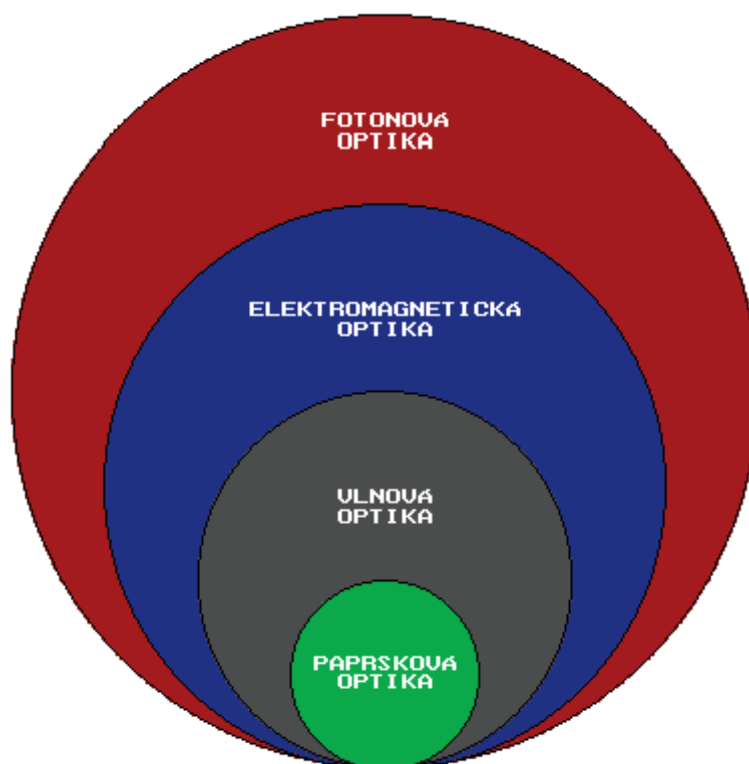
### Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty parametru dimenze.....	19
Tabulka 2: Hodnoty parametru , Kimův model [6].....	19
Tabulka 3: Rozdělení UV pásma.....	22
Tabulka 4: Path loss factor a path loss exponent.....	24

# 1 Úvod

V dnešní době, kdy je nedostatek vysílacích pásem, například pro mobilní operátory by se mohly pro spoje na krátké vzdálenosti používat komunikační zařízení využívající optickou část spektra. Pro provoz v tomto pásmu nejsou třeba žádné licence. Pracuje se zde s frekvencemi v řádu THz, což umožňuje podstatně větší šířku pásma, než jsme zvyklí u komunikací využívajících MHz. Optika poskytuje široké spektrum možností. Pro přímé spojení statických stanic lze využít infračervené spoje (IR), které jsou směrové (LOS). Pokud je třeba pokrýt prostor, užívá se ultrafialový spoj (UV). Ultrafialové vlnění je specifické tím, že se díky rozptylu na molekulách vzduchu nedokáže šířit formou svazku, ale rozptýlí se do prostoru. Díky této vlastnosti může vidět i "za roh" (NLOS). Nevýhodou ultrafialového záření je citlivost živé tkáně na toto záření. Avšak vhodnou volbou konkrétní vlnové délky a optimálního výkonu lze docílit neškodnosti.

## 2 Optika

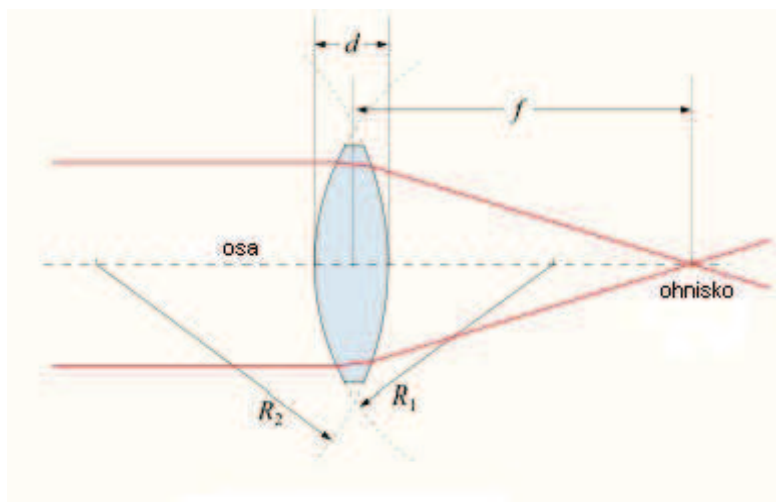


Obrázek 1: Klasifikace přístupu k teorii optiky, převzaté z [20]

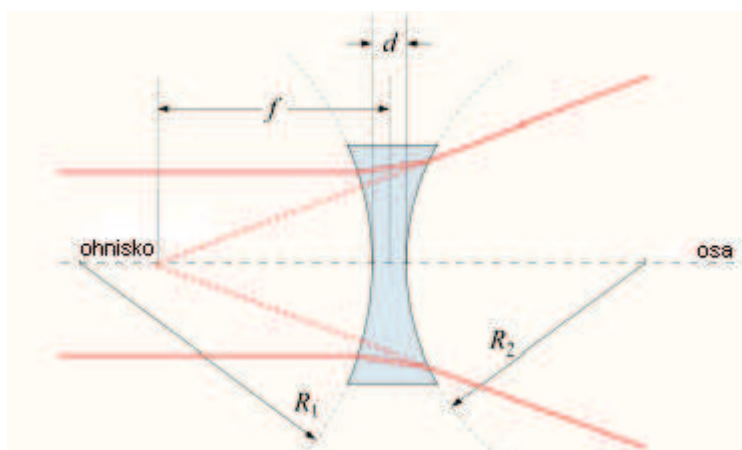
### 2.1 Geometrická optika

Geometrická optika popisuje interakce optického záření se základními optickými prvky, jako jsou čočky zrcadla, nebo hranoly. Základní typy čoček jsou spojné a rozptylné (obrázek 2 a 3), které jsou známy například z dalekohledu či mikroskopu. Další je multifokální, používaná ve 3D zobrazovacích systémech. Dále existuje například cylindrická, Fresnelova, asférická a mnoho dalších. Žádný optický prvek však není dokonalý. Asi hlavní vada čoček je chromatická aberace, kdy jednotlivé vlnové délky (barvy) jsou vychylovány do různých směrů.

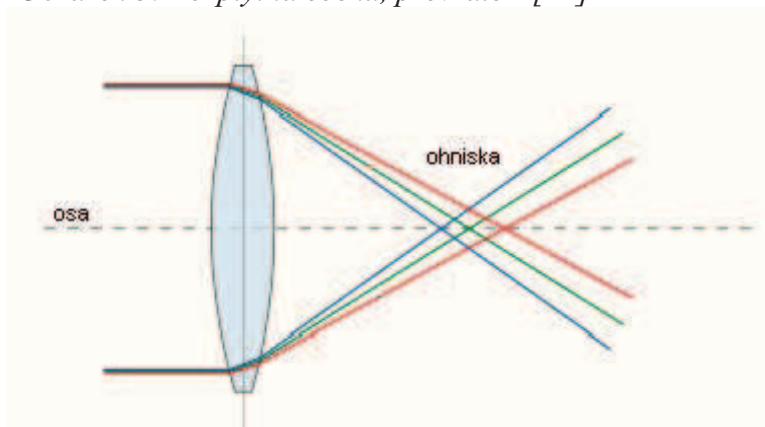
## Optická komunikace v UV pásmu



Obrázek 2: Spojná čočka, převzaté z [21]



Obrázek 3: Rozptylná čočka, převzaté z [21]

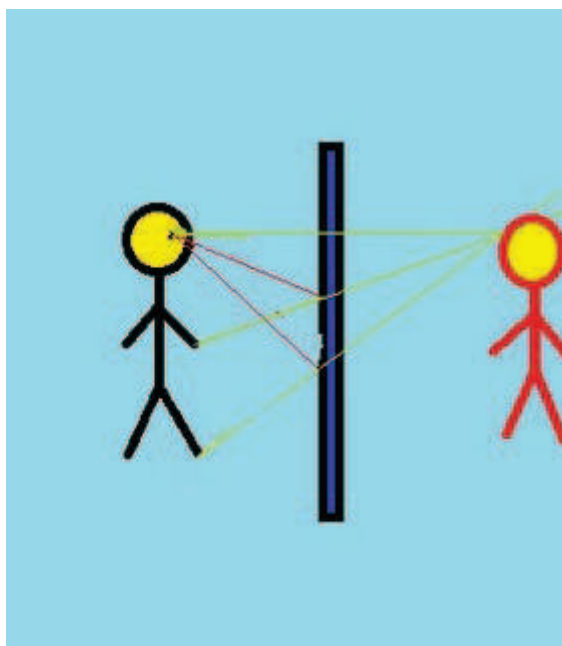


Obrázek 4: Chromatická aberace, převzaté z [21]

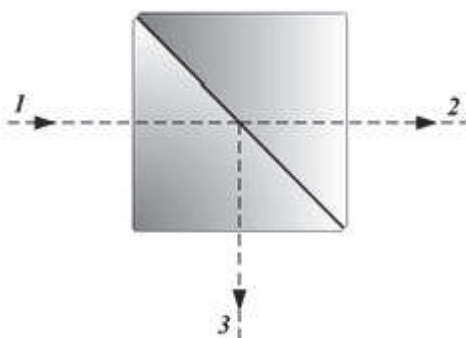
Na obrázku 4 jsou vidět různé ohniskové vzdálenosti pro jednotlivé vlnové délky.

Zrcadla se dělí na rovinná, konvexní a konkávní. Jsou známa již od starověku, kdy je údajně v bitvě u Salaminy používali Řekové k zapalování perských lodí [22]. Na obrázku 5 je vidět vlevo předmět a vpravo obraz za zrcadlem. Zvláštní typ zrcadla je dělič svazku (obrázek 6), který část vstupního optického výkonu propustí a zbytek odrazí.

## Optická komunikace v UV pásmu



Obrázek 5: Zobrazení pomocí zrcadla, převzaté z [23]



Obrázek 6: Dělič svazku [24]

Optický hranol (obrázek 7) rozkládá bílé světlo na jednotlivé barvy spektra, nebo naopak z jednotlivých barev může vytvořit bílé světlo. Opět zde figuruje aberace. U hranolu je žádoucí, v případě čoček se jedná nežádoucí jev.



Obrázek 7: Optický hranol [25]

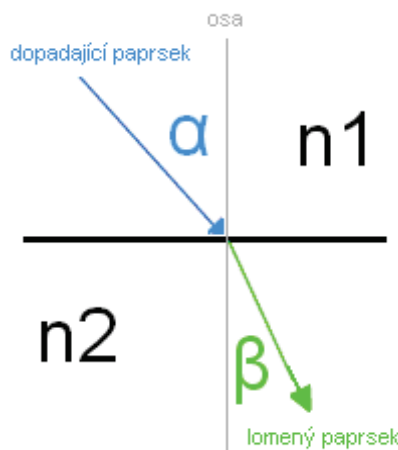
Nakonec podkapitoly nejdůležitější jev tohoto pohledu, lom. Každé prostředí charakterizují určité vlastnosti, nás zajímá rychlost světla  $c$ . Ta je totiž v každém prostředí jiná, což způsobuje lom svazku (obrázek 8). Každé prostředí je charakterizováno indexem lomu  $n$  který se dá spočítat jako

## Optická komunikace v UV pásmu

podíl rychlosti světla ve vakuu  $c_0$  a rychlosti světla v daném prostředí  $c$  (2.2). Úhel lomu se určí pomocí Snellova zákona

$$n_1 \cdot \sin(\alpha) = n_2 \cdot \sin(\beta) \quad . \quad (2.1)$$

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (2.2)$$



Obrázek 8: Lom světla, převzaté z [26]

## 2.2 Vlnová optika

Základem tohoto pohledu je tzv. vlnová rovnice (2.3) a vlnová funkce (2.4)

$$\nabla^2 \cdot u - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\delta^2 \cdot u}{\delta \cdot t^2} = 0 \quad , \quad (2.3)$$

$$u(r, t) = \frac{1}{2} \cdot \left[ U(r) \exp(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot v \cdot t) + U^*(r) \exp(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot v \cdot t) \right] , \quad (2.4)$$

kde  $\nabla$  je Laplaceův operátor,  $u$  vlnová funkce,  $c_0$  rychlost světla ve vakuu,  $U(r)$  komplexní amplituda v poloze  $r$ ,  $2\pi v$  úhlová rychlost fáze,  $t$  čas. Z těchto rovnic lze získat diferenciální Helmholtzovu rovnici

$$(\nabla^2 \cdot k^2) \cdot U(r) = 0 \quad , \quad (2.5)$$

kde  $k$  je vlnové číslo

$$k = \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{c} = \frac{\omega}{c} \quad . \quad (2.6)$$

Pro sférickou vlnu je řešení Helmholtzovy rovnice

## Optická komunikace v UV pásmu

$$U(r) = \frac{A}{r} \exp(-j \cdot k \cdot r) \quad , \quad (2.7)$$

$$I(r) = \frac{|A|^2}{r^2} \quad , \quad (2.8)$$

kde  $r$  je vzdálenost od počátku,  $I(r)$  intenzita, která je nepřímě úměrná druhé mocnině vzdálenosti [1].

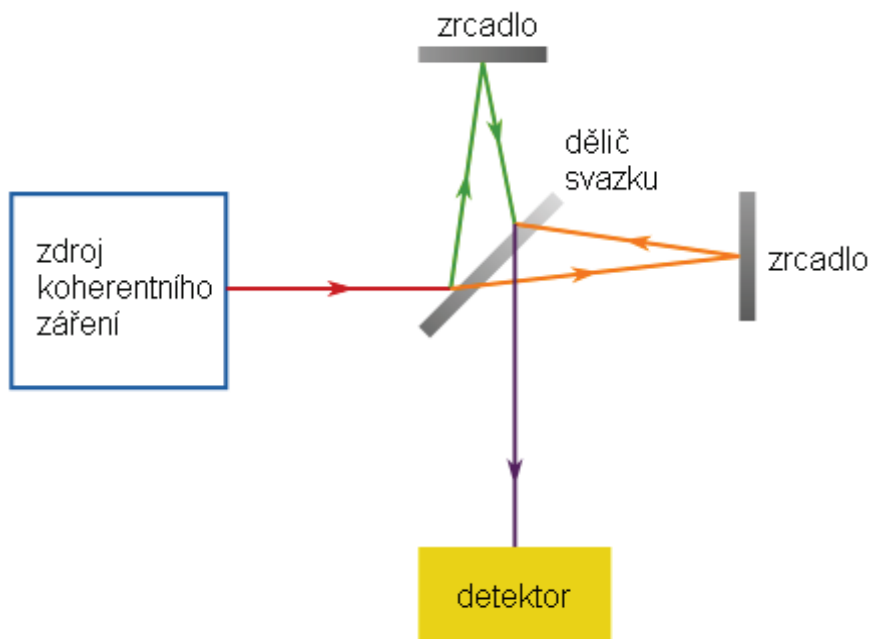
Vlnová optika dále popisuje jevy difrakce a interference. Difrakci dělíme na Fresnelovu a Fraunhoferovu. Hranice mezi nimi je definována Rayleighova vzdáleností  $z_0$  (2.19). Fresnelův pohled je založen na předpokladu, že dopadající vlna je vynásobena aperturní funkcí  $p(x,y)$  a šíří se dál ve volném prostoru podle Fresnelovy aproximace. Fraunhoferův pohled popisuje průchod světla aperturou za předpokladu, že dopadající vlna je násobena aperturní funkcí a s použitím Fraunhoferovy aproximace pro šíření světla ve volném prostoru za clonou [1].

Interference dvou vln je popsána interferenční rovnicí

$$I = I_1 + I_2 + (I_1 \cdot I_2)^{\frac{3}{2}} \cdot \cos(\varphi) \quad , \quad (2.9)$$

kde  $I_1$  a  $I_2$  jsou intenzity jednotlivých svazků a  $\varphi$  je jejich fázový rozdíl. Tato rovnice říká, že při styku dvou (nebo více) vln v prostoru je výsledná vlnová funkce dána součtem všech vlnových funkcí. Jevu interference se využívá v interferometrech. Jsou to optické přístroje, které pomocí děliče svazku rozdělí vstupní vlnu do dvou směrů. Tyto dvě vlny urazí stejné optické vzdálenosti. Pomocí zrcadel se navedou na opětovné spojení v děliči svazku. Nakonec se detekuje intenzita jejich superpozice. Nejznámější typy interferometrů jsou: Machův-Zehnderův, Michelsonův (obrázek 9), Sagnacův a spousta dalších [1].

Díky vlnovému pohledu na optiku je možné zavést pojem polychromatická vlna, kterou lze rozložit do Fourierovy řady jako součet monochromatických vln. Vliv jakékoli optické soustavy na polychromatickou vlnu můžeme určit jako superpozici vlivů na jednotlivé monochromatické vlny, ze kterých se tato polychromatická vlna skládá. [1]



Obrázek 9: Michelsonův interferometr, převzaté z [28]

## Optická komunikace v UV pásmu

Důležitým řešením vlnové rovnice pro případ paraxiální vlny je vlna, která se nazývá **Gaussův svazek**. Optický výkon Gaussova svazku je soustředěn do úzkého kužele a optická intenzita v rovině kolmé na směr šíření vlny je dána kruhově symetrickou gaussovskou funkcí s maximem  $I_0$  na ose svazku (osa 0z). Kraj svazku je definovaný poklesem optické intenzity na hodnotu  $I_0/e^2$ . Vzdálenosti kraje svazku od osy se říká pološířka svazku s označením  $w(z)$ . Nejužší místo Gaussova svazku se nazývá krček, v něm je pološířka svazku  $w_0$  nejmenší [2][1].

## 2.3 Elektromagnetická optika

Elektromagnetické záření se šíří ve tvaru dvou navzájem navázaných vektorových vln, a to vlny elektrického pole a vlny magnetického pole. Světlo je tedy optické záření, jehož šíření je popsáno Maxwellovými rovnicemi. Zde jsou uvedeny Maxwellovy rovnice pro monochromatické světlo šířící se v lineárním, homogením, izotropním, nedisperzním prostředí bez zdrojů. [1]

$$\nabla \times \mathbf{H} = j \cdot \omega \cdot \epsilon \cdot \mathbf{E}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H} \quad (2.10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0.$$

$$\epsilon_0 \approx \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9}$$

hodnoty  
platné  
pro  
vakuum

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad , \quad (2.11)$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}}$$

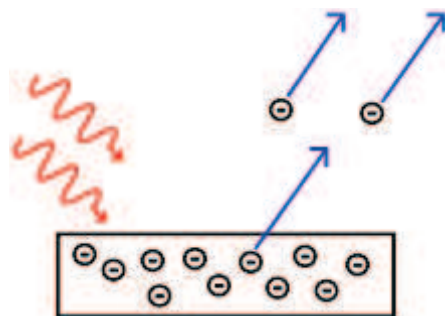
Podle interakce s EM zářením rozlišujeme různé druhy prostředí. U lineárního prostředí závisí vektor polarizace lineárně na vektoru intenzity elektrického pole. U nedisperzního prostředí je odezva optického signálu okamžitá. V homogením prostředí je vztah mezi vektorem polarizace a vektorem intenzity elektrického pole nezávislý na prostorových souřadnicích. V izotropním prostředí je vztah mezi vektorem polarizace a vektorem intenzity elektrického pole nezávislý na směru vektoru intenzity [3].

Elektromagnetickou optikou jsou dále popsány jevy absorpce, interference, difrakce a disperze, které budou rozebrány v kapitole 4 - Přenosové prostředí.



## 2.4 Fotonová optika

Tato část optiky je nejmladší. Zavedl ji teprve v minulém století Albert Einstein, protože např. fotoelektrický jev (obrázek 10) nebylo možné vysvětlit na základě dotehdy známých zákonů fyziky. Dalším průkopníkem v této oblasti byl Max Planck, který popsal záření černého tělesa a je po něm pojmenována Planckova konstanta  $h$ .



Obrázek 10: fotoelektrický jev  
[29]

Fotoelektrický jev popisuje fotoemisi, děj při kterém látka absorbuje dopadající elektromagnetické záření, což způsobí emisi elektronů v této látce.

$$E = m \cdot c^2 = h \cdot \nu = \hbar \cdot \omega, \quad (2.12)$$

kde  $m$  je hmotnost tělesa,  $c$  rychlost světla ve vakuu,  $h$  Planckova konstanta,  $\nu$  kvantová frekvence fotonu,  $\hbar$  redukovaná Planckova konstanta,  $\omega$  úhlová frekvence a  $\lambda$  vlnová délka.

$$\hbar = \frac{h}{2 \cdot \pi},$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu, \quad (2.13)$$

$$\nu = \frac{c_0}{\lambda}$$

Jak již název napovídá fotonová optika se zabývá fotony. Fotony patří do skupiny intermediálních elementárních částic zvané bosony. Mají nekonečnou životnost a nekonečný poločas rozpadu. Nemají žádný elektrický náboj. Vznikají a zanikají při interakcích, jako je fotoelektrický jev. Všechno elektromagnetické záření je kvantováno na fotony, foton je tedy nejmenší nedělitelné množství energie. [2]

## 2.5 Základní optické veličiny[4]

- **vlnová délka**  $\lambda$  je nejmenší vzdálenost dvou bodů se stejnou fází
- **šířka spektrální čáry** je definována, jako celková šířka pásu  $\Delta\nu$  na polovině maximální hodnoty, viz obrázek 13
- **fázová rychlost** určuje rychlost šíření ploch se stejnou fází
- **grupová rychlost** určuje, jak rychle bude přenesena energie pomocí vlnění

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (2.14)$$

- **optická intenzita** je nejdůležitější parametr optické vlny s ohledem na měření, zde rovnice platná pro Gaussův svazek [5]

$$I(\rho, z) = I_0 \cdot \left[ \frac{w_0}{w(z)} \right]^2 \exp\left(\left[ \frac{-2 \cdot \rho^2}{w^2(z)} \right]\right) \quad (2.15)$$

- **pološířka svazku**

v krčku

$$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda \cdot z_0}{\pi}} \quad (2.16)$$

ve vzdálenosti  $z$

$$w(z) \approx \frac{w_0}{z_0} \cdot z = \Phi_0 \cdot z \quad (2.17)$$

- **úhel divergence**; daleko od středu svazku ( $z \gg z_0$ ) vzrůstá jeho poloměr přibližně lineárně s rostoucím  $z$  a vytváří kužel s vrcholovým úhlem  $2\Phi_0$  [6]

$$\Theta_0 = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot w_0} \quad (2.18)$$

- **Rayleighova vzdálenost** je vzdálenost s největším zakřivením a nejmenším poloměrem křivosti

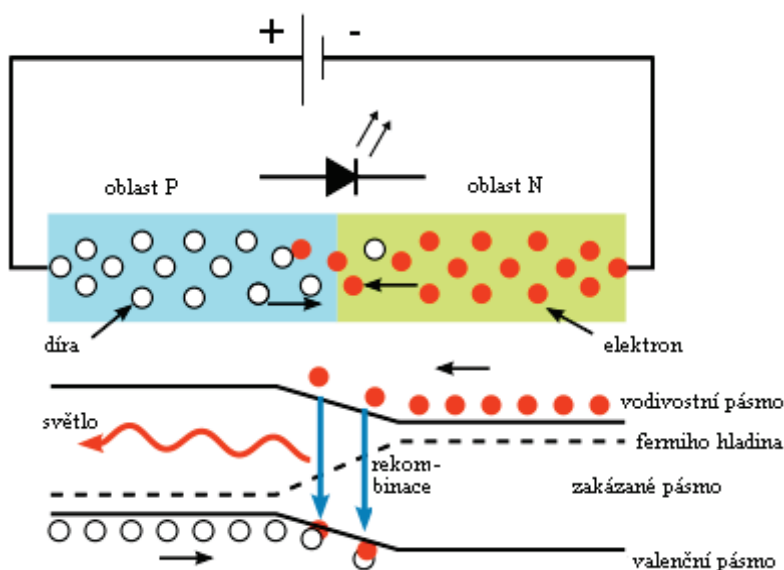
$$z_0 = \frac{\pi \cdot w^2}{\lambda} \quad (2.19)$$

- **koherence**; vzájemná souvislost vlnění vycházejících buď ze dvou různých míst na povrchu zářícího tělesa (prostorová koherence), nebo vlnění vycházejícího z jednoho místa, avšak s určitým časovým odstupem (časová koherence)

## 3 Zdroje a přijímače optického výkonu

### 3.1 Polovodičové součástky

Nejrozšířenějším zdrojem/přijímačem optického záření jsou LED diody (obrázek 11). Je-li její přechod zapojen v propustném směru, generuje nekoherentní záření, jehož vlnová délka závisí na použitém materiálu a velikosti napájecího napětí. Ke každému elektronickému prvku existuje i jeho optoelektronický ekvivalent (dioda x fotodioda), kde je jedna elektrická veličina (proud) nahrazena dopadajícím optickým výkonem. Fotodioda stejně jako fotorezistor využívají vnitřní fotoelektrický jev. Neosvětlená fotodioda má stejnou VA charakteristiku jako klasická polovodičová dioda. Osvětlením se však polarizuje do závěrného směru - roste jí anodový proud. Zvláštní typ fotodiody je lavinová fotodioda, což je velmi citlivý fotodetektor. Pracuje v tzv. Geigerově režimu, má extrémě vysoký zisk, dá se použít pro čítání jednotlivých fotonů. Dalším typem diody je PIN dioda, která má mezi oblastí P a N vloženou oblast intrinzického polovodiče. Vodivost fotorezistoru je přímo úměrná jeho osvětlení. Narozdíl od klasického tranzistoru, kde je hlavní parametr pro otevření báze proud, u fototranzistoru je hlavní parametr pro otevření osvětlení emitoru, jemuž je přímo úměrná vodivost kanálu. Fototyrystor má stejné vlastnosti jako tyrystor, neřídí se však proudem do hradla, nýbrž jeho osvětlením. Další neméně důležitá součástka je fotonásobič, s nímž je možné detekovat velmi slabé signály. Zvláštním případem fotonásobiče je scintilační detektor. Je

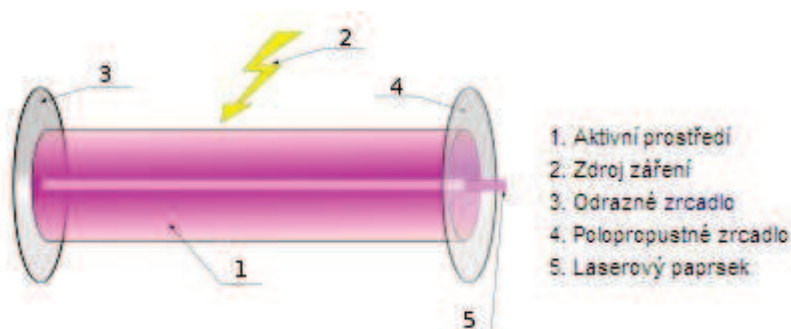


Obrázek 11: Led dioda, převzaté z [29]

to zařízení schopné detekovat ionizující záření. Ionizující záření dopadající na tento detektor způsobuje, že elektrony vystupují na vyšší energetickou hladinu, případně opouští atom. Následně se však vrací zpět na původní energetickou hladinu. Svoji energii však vyzáří v podobě světla viditelného lidským okem. Tedy čím více optického výkonu vyzařuje, tím více radioaktivního záření se nachází v jeho okolí.

### 3.2 Lasery

Laser (obrázek 12), neboli optický oscilátor je zdroj koherentního optického záření. Skládá se z rezonančního optického zesilovače, jehož výstupní signál se zpětnou vazbou vrací zřazovaný zpět na vstup rezonátoru. Aby však laser skutečně vydával koherentní záření, musí jeho aktivní prostředí správe oscilovat, což má dvě podmínky. První je, že zisk zesilovače musí být větší, než útlum zpětné vazby. Druhá podmínka je, že celková změna fáze při jednom oběhu musí být celočíselným násobkem  $2\pi$ . Tyto podmínky však lze splnit pouze pro několik kmitočtů, na kterých oscilátor rezonuje.



Obrázek 12: Konstrukce laseru, převzaté z [30]

Zesílení se dosahuje stimulovanou emisí v atomárních, nebo molekulárních systémech při průchodech mezi energetickými hladinami s inverzním obsazením. Koeficient zesílení malého signálu se počítá:

$$g_0(\nu) = N_0 \cdot \sigma(\nu) = N_0 \cdot \frac{\lambda^2}{8 \cdot \pi \cdot t_{sp}} \cdot g(\nu) \quad , \quad (3.1)$$

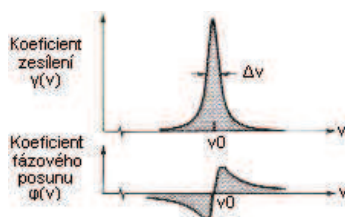
kde  $N_0$  je rovnovážná hustota inverzního obsazení hladin,  $\sigma(\nu)$  je efektivní průřez přechodu,  $t_{sp}$  doba spontálního přechodu,  $g(\nu)$  funkce tvaru spektrální čáry přechodu,  $\lambda$  vlnová délka v prostředí. Pro saturovaný koeficient zesílení platí vztah:

$$g(\nu) = \frac{g_0(\nu)}{1 + \Phi / \Phi_s(\nu)} \quad , \quad (3.2)$$

kde  $\Phi_s(\nu)$  je saturační hustota fotonového toku,  $\Phi$  hustota fotonového toku. Koeficient fázového posunu, neboli Lorentzův tvar čáry dostaneme:

$$\varphi(\nu) = \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu} \cdot g(\nu) \quad , \quad (3.3)$$

vzorec 3.3 objasňuje obrázek 13



Obrázek 13: Koeficienty  $\nu_0$  a  $\Delta \nu$ , převzaté z [1]

## Optická komunikace v UV pásmu

Optická zpětná vazba se dosahuje umístěním aktivního prostředí do optického rezonátoru. I zde dochází ke ztrátám (3.5) a změně fáze, která je rovna vlnovému číslu  $k$ . [1]

$$k = \frac{2 \cdot \pi \cdot \nu}{c} \quad (3.4)$$

koeficient ztrát  $\alpha_r = \alpha_s + \alpha_{m1} + \alpha_{m2}$ ,

$\alpha_{m1}$  a  $\alpha_{m2}$  jsou ztráty zrcadel  $\alpha_{m1} = \frac{1}{2 \cdot d} \ln\left(\frac{1}{R_1}\right)$ ,

$R_1$  a  $R_2$  jsou odrazivosti zrcadel  $\alpha_{m2} = \frac{1}{2 \cdot d} \ln\left(\frac{1}{R_2}\right)$ ,

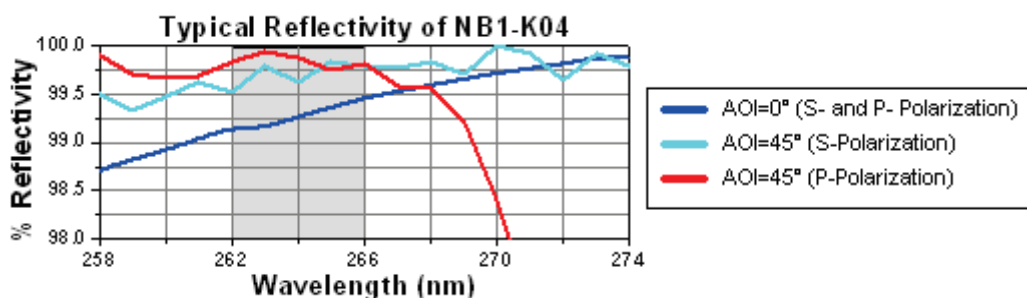
$\alpha_r$  je celkový koeficient ztrát

$\alpha_s$  je koeficient zeslabení

(3.5)

### 3.3 Konkrétní zdroje pro UV oblast

Laser Nd:YAG, má široké spektrum vlnových délek, jakož i použití. Nás tento laser zajímá pracující na čtvrté, nebo páté harmonické. Tehdy generuje záření vlnových délek 266nm, respektive 213 nm. Pro každou vlnovou délku existuje typické výstupní zrcadlo. Zrcadla pro čtvrtou harmonickou (NB1-K04) vyrábí například firma Thorlabs [7]. Dalším laserem je laser KrF pracující



Obrázek 14: Spektrální závislost odrazivosti zrcadla NB1-K04 v rozmezí (258 - 274)nm, převzaté z [7]

na vlnové délce 248 nm. Tentokrát se zrcadlem NB1-H03 také od společnosti Thorlabs [8]. Poslední je laser Alexandrite pracující se třetí harmonickou. Vlnová délka optického záření emitovaného tímto laserem je v rozmezí (240 - 280) nm.

## 4 Přenosové prostředí

### 4.1 Dualita světla

Pojem dualita se týká veškeré hmoty, nejvíce se projevuje u částic s malou hmotností, především u částic elementárních, tedy i fotonů. To, že se chování fotonů dá za určitých okolností popsat jako elektromagnetické vlnění a jindy zase jako proud částic objevil v roce 1905 Albert Einstein, protože pouze tímto způsobem se dá objasnit fotoelektrický jev (obrázek 10).

Částicovou povahu světla plně objasňuje kvantová teorie, která říká, že foton je světelná částice s nulovou klidovou hmotností pohybující se nezávisle na vztažné souřadnicové soustavě rychlostí  $c$ . Ze vztahu 2.2 lze odvodit vztah pro rychlost světla v daném prostředí:

$$c = \frac{c_0}{n}, \quad (4.1)$$

kde  $c_0$  je rychlost světla ve vakuu a  $n$  index lomu. Úpravou vztahu 2.12 lze vyjádřit energii fotonu jako

$$E = \frac{h}{2\pi} \cdot \omega = \frac{h}{T} = h \cdot \nu = \hbar \cdot \omega, \quad (4.2)$$

dále pro hybnost fotonu platí následující vztah

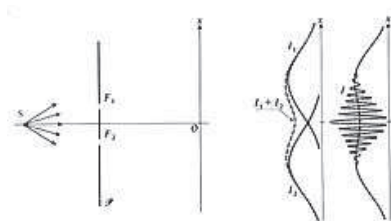
$$\vec{p} = \hbar \cdot \vec{k}, \quad (4.3)$$

kde  $\hbar$  je redukovaná planckova konstanta (vzorec 2.13) a  $\vec{k}$  je vlnový vektor (vzorec 2.6).

Vlnovou povahu světla objasňují jevy interference a difrakce, které se projevují na veškerém elektromagnetickém záření a jsou popsány níže v této kapitole.

### 4.2 Interference

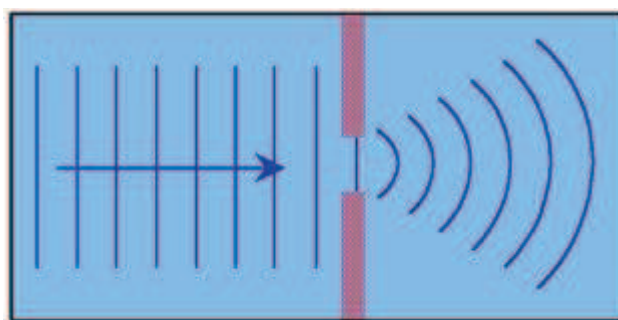
Lze ji pozorovat například na mýdlové bublině, kde jsou vidět různé barvy, které vznikají konstruktivní a destruktivní interferencí. Interferencí se poprvé zabýval Christian Huygens. V roce 1678 definoval světlo jako vlnění. Zformuloval následující zákon: Všechny body na vlnoploše slouží jako bodové zdroje sekundárních kulových vlnoploch; po nějakém čase  $\Delta t$  bude novou polohou vlnoplochy tečná plocha k těmto sekundárním vlnoplochám. Dále definoval index lomu, jako poměr rychlosti světla ve vakuu k rychlosti světla v daném prostředí (2.2). Další kdo se interferencí zabýval byl Thomas Young, který je znám svým interferenčním pokusem, kdy vzniká tzv. Youngův interferenční obrazec (obrázek 15), kde jsou znázorněná minima a maxima optické intenzity způsobená konstruktivní a destruktivní interferencí. Interference je využívána k velmi přesnému měření délky, nebo délkové změny pomocí interferenčních proužků v zařízeních zvaných interferometr. Interferometrů existuje mnoho druhů, nejznámější je Michelsonův interferometr (obrázek 9).



Obrázek 15: Youngův pokus [31]

### 4.3 Difrakce

Difrakce souvisí s vlnovou teorií světla. Světlo za štěrbinou vytváří difrakční obrazec s centrálním maximem a sekundárními maximy po obou stranách. Difrakcí jsou dva druhy, Fresnelova a Fraunhoferova. Fresnelova difrakce zkoumá intenzitu jako funkci polohy v rovině kdesi v konečné vzdálenosti za difrakčním stínítkem. Fraunhoferova difrakce zkoumá rozložení intenzity jako funkce směrů. To je důležité při studiu zobrazení optickými soustavami. Hranice mezi těmito oblastmi je Rayleighova vzdálenost (2.19).



Obrázek 16: Difrakce na štěrbině [32]

### 4.4 Disperze a absorpce

Jako neexistuje dokonalý vodič s nulovým odporem, neexistuje ani optické prostředí, ve kterém by nedocházelo ke ztrátám. Obecně je známo, že za oknem se nedá opalovat. To je způsobeno tím, že sklo absorbuje ultrafialové i infračervené záření, propouští pouze světlo z viditelné části spektra. Každé prostředí je charakterizováno svojí susceptibilitou:

$$\chi = \chi' + j \cdot \chi'' \quad , \quad (4.4)$$

kde  $\chi'$  je reálná složka susceptibility a  $\chi''$  její imaginární složka. Koeficient extince je stejně jako index lomu závislý na frekvenci optického záření. Lze ho odvodit z Kramersových-Kronigových vztahů, které popisují reálnou a imaginární složku susceptibility:

$$\chi' = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \frac{s \cdot \chi''(s)}{s^2 - \nu^2} ds \quad , \quad (4.5)$$

$$\chi'' = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \frac{\nu \cdot \chi'(s)}{\nu^2 - s^2} ds \quad , \quad (4.6)$$

## Optická komunikace v UV pásmu

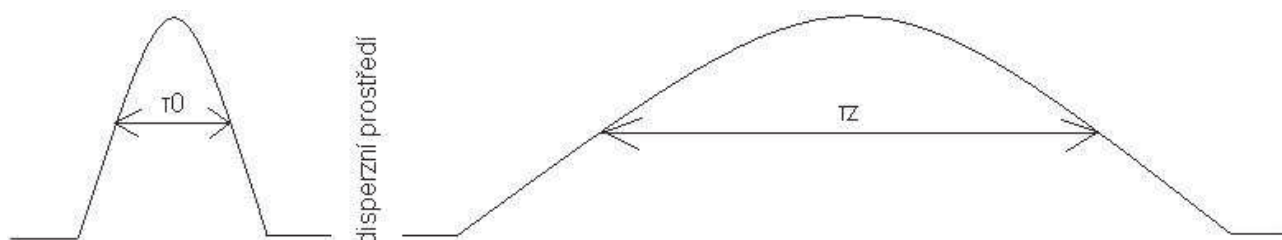
kde  $s$  je délka disperzního prostředí, odtud koeficient extince  $\alpha$  a index lomu  $n$

$$n \approx n_0 + \frac{\chi'}{2 \cdot n_0}, \quad (4.7)$$

$$\alpha \approx -\frac{k_0 \cdot \chi''}{n_0}, \quad (4.8)$$

kde  $k_0 = \omega/c_0$  je vlnové číslo ve vakuu a  $n_0$  je index lomu neabsorbujícího prostředí.

V podkapitole 2.1 Geometrická optika je zmíněna chromatická aberace. K tomuto jevu dochází právě důsledkem disperze. Je to dáno různým časovým zpožděním jednotlivých vlnových délek, způsobeným frekvenční závislostí indexu lomu. Obrázek 17 popisuje změnu doby trvání pulzu po průchodu disperzním prostředím.  $\tau_0$  je doba trvání vyslaného pulzu,  $\tau_z$  je doba trvání téhož pulzu ve vzdálenosti  $z$  [1].



Obrázek 17: Vliv disperzního prostředí na optický svazek

## 4.5 Rozptyl

K určení typu rozptylu slouží parametr dimenze (4.9). V tabulce 1 jsou uvedeny hodnoty parametru dimenze pro jednotlivé částice a komerčně používané vlnové délky. Obrázek 15 ukazuje rozdělení druhů rozptylů podle hodnoty parametru dimenze. Parametr dimenze se spočítá takto:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda}, \quad (4.9)$$

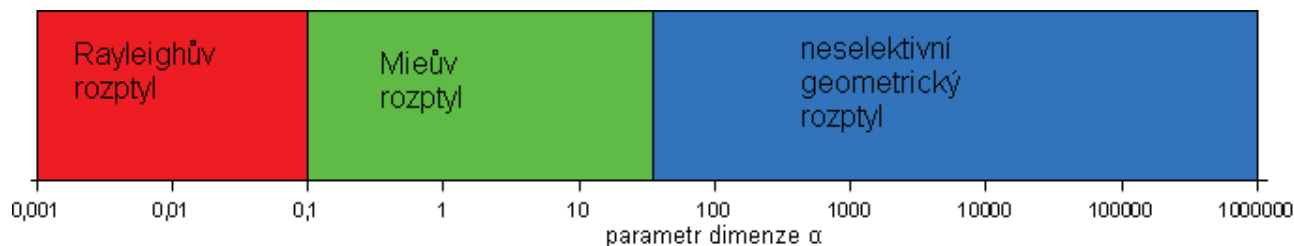
kde  $r$  je poloměr částice a  $\lambda$  vlnová délka záření. Pro ultrafialovou oblast spektra je nejdůležitější Rayleighův rozptyl, případně Mieův rozptyl. Rayleighův rozptyl vzniká na částicích mnohem menších, než je vlnová délka záření ( $r \ll \lambda$ ). Na ultrafialovém záření je typický rozptyl na molekulách vzduchu. Protože zemská atmosféra není statická, ale stále se pohybuje, dochází k fluktuacím hustoty vzduchu. To zapříčiňuje vznik turbulentních buněk. Mieův rozptyl vzniká na větších částicích než jsou molekuly vzduchu. Je to především na aerosolech, tedy v mlze, nebo mrholení ( $r \sim \lambda$ ). Dále existují ještě Ramanův rozptyl vznikající interakcí fotonů s fonony. A Comptonův rozptyl vznikající interakcí záření s vysokou energií s látkou tvořenou atomy s nízkými protonovými čísly. Fotony mění směr, ztrácí energii a roste jejich vlnová délka [6].



## Optická komunikace v UV pásmu

typ částic	poloměr (μm)	parametr dimenze α			
		213 nm	248 nm	266 nm	308 nm
molekula vzduchu	0,0001	0,0029	0,0025	0,0024	0,002
slabé mrholení	0,01 - 1	0,295 - 29	0,253 - 25	0,236 - 24	0,204 - 20
hustá mlha	1 - 20	29 - 590	25 - 506	24 - 472	20 - 410
děšť	100 - 10000	2900 - 290000	2500 - 250000	2400 - 240000	2000 - 200000
sníh	1000 - 5000	29000 - 150000	25000 - 130000	24000 - 120000	20000 - 100000
krupobití	5000 - 50000	150000 - 1500000	130000 - 1300000	120000 - 1200000	100000 - 1000000

Tabulka 1: Hodnoty parametru dimenze



Obrázek 18: Rozdělení druhů rozptylů podle hodnoty parametru dimenze

Dalším parametrem je propustnost atmosféry, kterou udává Beerův-Lambertův zákon:

$$\tau(\lambda, L) = \frac{I_1(\lambda, L)}{I_2(\lambda, 0)} = e^{-\gamma(\lambda) \cdot L}, \quad (4.10)$$

kde  $\tau(\lambda)$  je propustnost atmosféry pro vlnovou délku  $\lambda$ ,  $I_1(\lambda, L)$  optická intenzita ve vzdálenosti  $L$ ,  $I_2(\lambda, 0)$  vyzářená optická intenzita a  $\gamma(\lambda)$  extinkční koeficient, který se dostane následovně:

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda), \quad (4.11)$$

kde  $\alpha_m, \alpha_a$  jsou koeficienty absorpce na molekulách a aerosolech,  $\beta_m, \beta_a$  jsou koeficienty rozptylu na molekulách a aerosolech. Nejdůležitější parametry jsou  $\beta_a$  a  $\beta_m$ , protože právě na molekulách vzduchu, jak je uvedeno výše, vzniká Rayleighův rozptyl, případně Mieův rozptyl, které jsou pro tuto oblast spektra nejdůležitější. Parametry  $\beta_a$  a  $\beta_m$  lze aproximovat vztahy:

$$\beta_a(\lambda) = \frac{3,912}{V} \cdot \left( \frac{\lambda_{nm}}{550} \right)^{-q}, \quad (4.12)$$

$$\beta_m = \frac{8 \cdot \pi^3 \cdot (n^2 - 1)^2}{3 \cdot M \cdot \lambda^4} \cdot \frac{6 + 3 \cdot \delta}{6 - 7 \cdot \delta}, \quad (4.13)$$

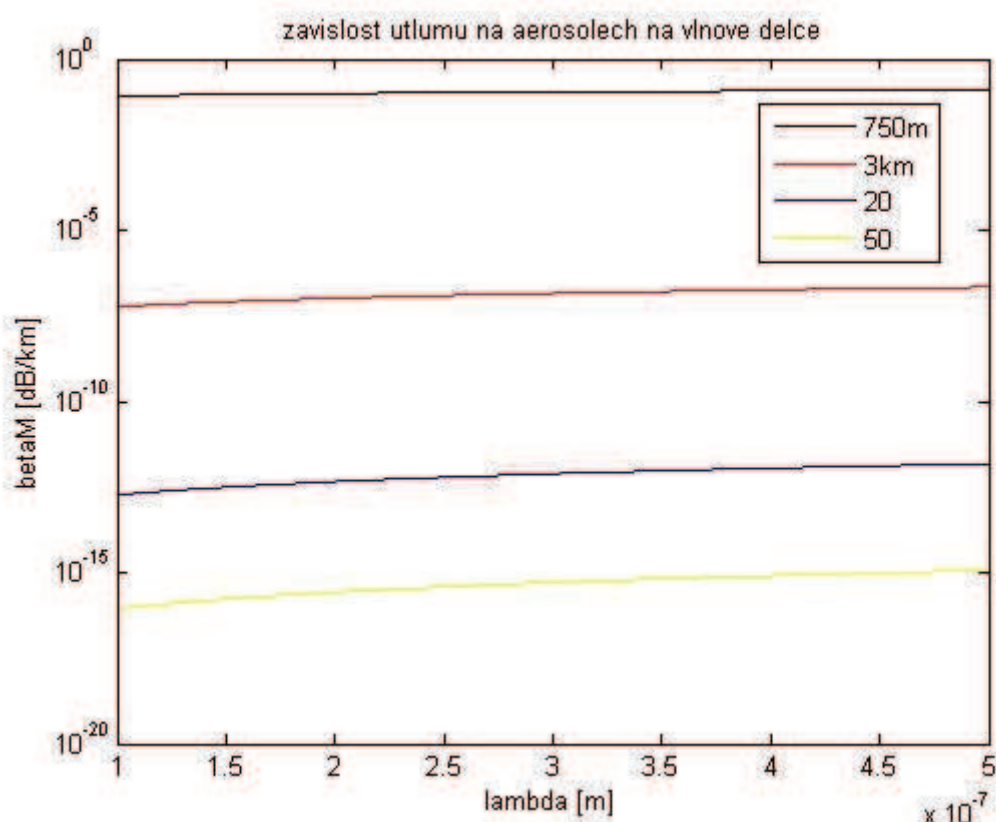
kde  $V$  je meteorologická viditelnost udávaná v kilometrech a  $\lambda_{nm}$  je vlnová délka záření udávaná v nanometrech,  $\lambda$  vlnová délka v metrech,  $M$  počet molekul na jednotku objemu,  $n$  index lomu prostředí,  $\delta$  je depolarizační faktor, je to konstanta -  $\delta = 0,035$ . Parametr  $q$  určuje Kimův model podle tabulky 2 [6][10].

parametr q [-]	meteorologická viditelnost V [km]
1,6	$V > 50$
1,3	$6 < V < 50$
$0,16 \cdot V + 0,34$	$1 < V < 6$
$V - 0,5$	$0,5 < V < 1$
0	$V < 0,5$

Tabulka 2: Hodnoty parametru, Kimův model [6]

## Optická komunikace v UV pásmu

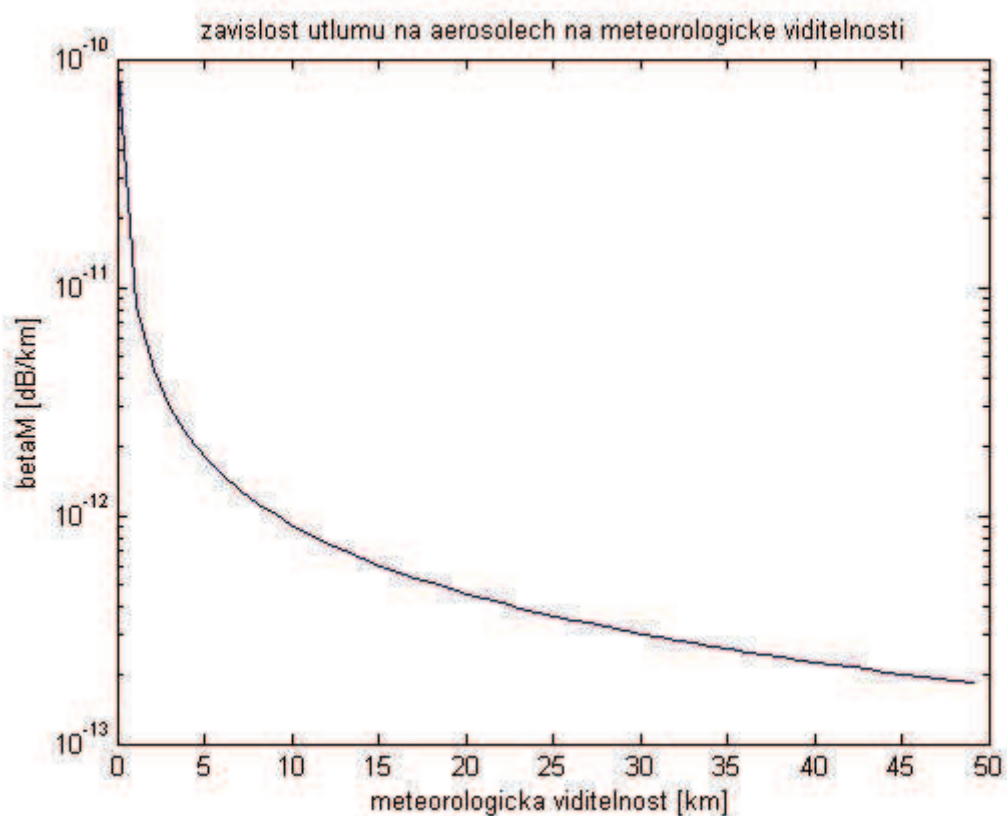
Koeficienty  $\alpha_m$  a  $\alpha_a$  jsou zanedbatelné. Útlum ultrafialového záření probíhá především v ozonové vrstvě, což je část stratosféry ve výšce 25-35 kilometrů nad zemským povrchem. Při pozemní komunikaci tedy signál není absorbován. Naopak ultrafialová část spektra záření Slunce je silně absorbována, především v pásmu UVC, díky čemuž je velmi nízký šum pozadí, což umožňuje vysílat nižší optické výkony. U zemského povrchu se sice nachází přízemní ozon, jehož výsky je však zcela náhodný a vyskytuje se v nízkých koncentracích. Zde jsou uvedeny grafy pro závislosti  $\beta_a = f(\lambda)$ ,  $\beta_a = f(V)$ ,  $\beta_m = f(\lambda)$  spočítané podle vzorců 4.12 a 4.13. Závislosti jsou zpracované pro komerčně používané vlnové délky (tabulka 1). Počet molekul v  $1\text{m}^3$  vzduchu byl na základě [11] stanoven na  $M = 2,0833333 \cdot 10^{25}$ .



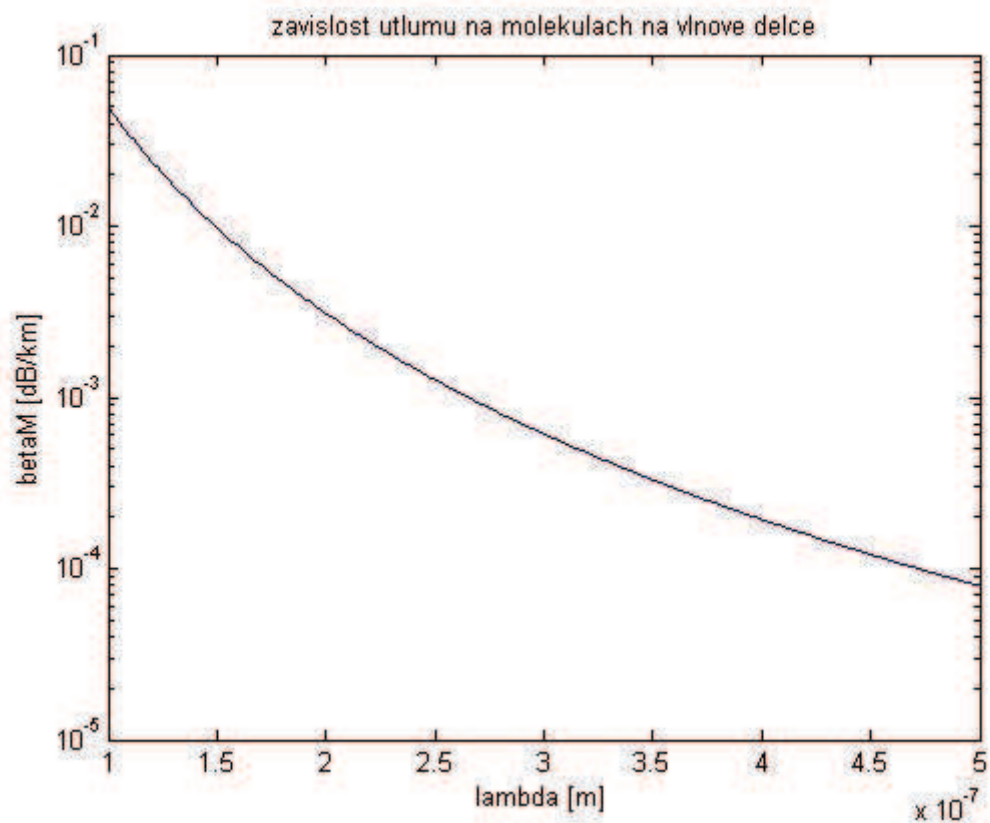
obrázek 19: Útlum na aerosolech (1)

Obrázek 19 ukazuje závislost útlumu na aerosolech pro vybrané hodnoty meteorologických viditelností na spektru ultrafialových vlnových délek. Na obrázku 20 je znázorněna závislost útlumu na aerosolech na meteorologické viditelnosti pro vlnovou délku 200 nm. Hodnoty útlumu na aerosolech jsou v ultrafialové oblasti zanedbatelné. Útlum na molekulách závisí pouze na vlnové délce, tuto závislost zobrazuje obrázek 21. Útlum na molekulách je větší, než na aerosolech, protože vlnová délka ultrafialového záření je blíží rozměrům molekul vzduchu. Přesto i zde dosahuje útlum zanedbatelných hodnot.

## Optická komunikace v UV pásmu



obrázek 20: Útlum na aerosolech (2)



obrázek 21: Útlum na molekulách

## 5 Vliv UV záření na živé organismy

Ultrafialová část spektra se rozděluje na tři podčásti, a to UVA, UVB a UVC. Existuje více metodik pro rozlišování těchto podčástí. Při studiu životního prostředí či dermatologie se používá rozdělení podle tabulky 3.

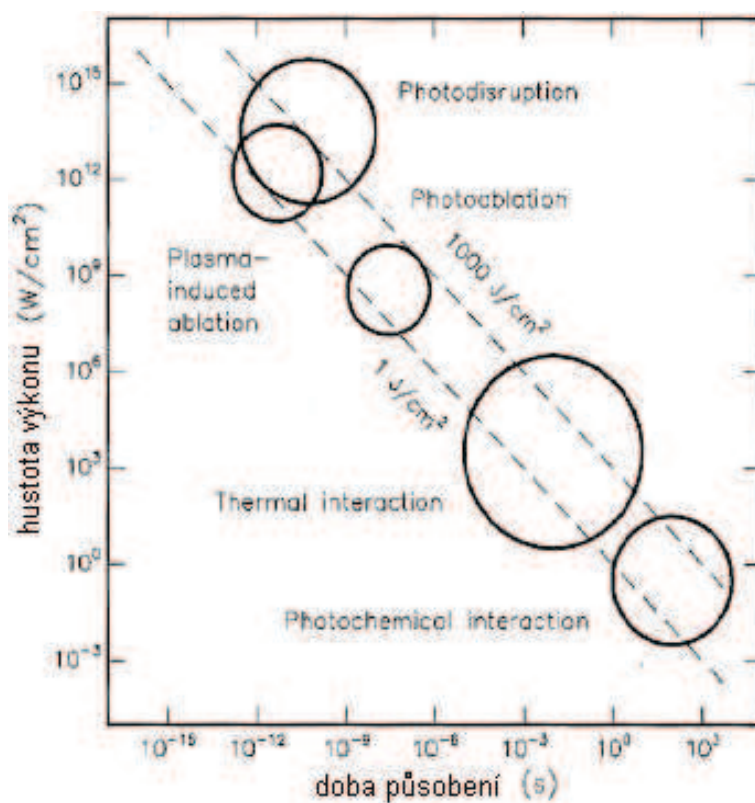
pásma	$\lambda$ [nm]	
	od	do
UVA	400	320
UVB	320	290
UVC	290	200

*Tabulka 3: Rozdělení UV pásma*

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 4.5, záření UVC je atmosférou zcela pohlceno. Díky tomu máme v tomto pásmu nulové rušení. Avšak na druhou stranu toto záření je plně pohlcováno z velmi dobrého důvodu. Tyto vlnové délky se již blíží vlnovým délkám rentgenového záření, které ve spektru následuje za ultrafialovým. Jelikož změna vlastností záření je spojitá vykazuje i toto záření mírně ionizující vlastnosti, má velkou schopnost procházet tkáněmi a narušovat je, jedná se tedy o karcinogenní záření. UVC záření se podílí na vzniku ozonu v atmosféře, kdy dvouatomovým molekulám kyslíku dodává dost energie k tomu, aby mohly vzniknout tříatomové molekuly. UVB záření je částečně pohlceno ozonovou vrstvou, UVA prochází na zemský povrch téměř nezměněno. UVA a UVB se dají považovat za bezpečné, vždy však záleží na vysílaném výkonu!

Kromě ozonové vrstvy je jsou živí tvorové chráněni vlastním pigmentem. Čím tmavší člověk je, tím více pigmentu obsahuje jeho kůže a tím více je chráněn před účinky ultrafialového záření. Na druhou stranu vystavovat se ultrafialovému záření je také zdraví prospěšné, neboť se v kůži díky němu syntetizuje vitamin D [12].

## Optická komunikace v UV pásmu

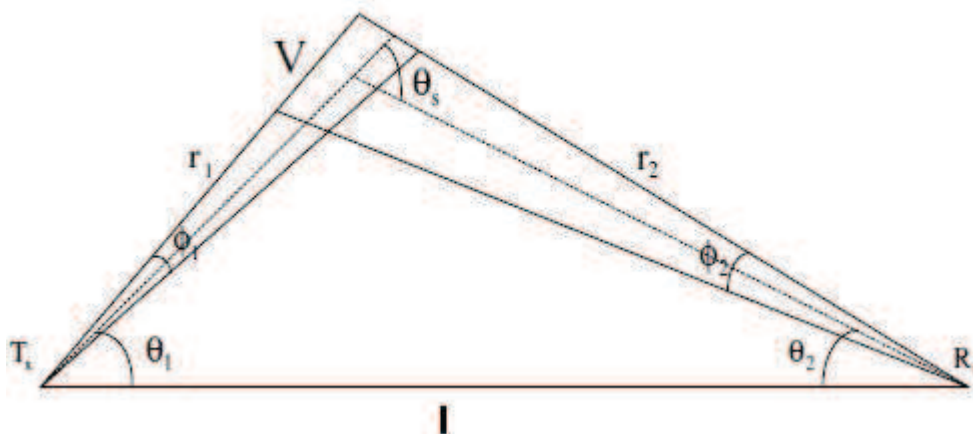


Obrázek 22: Účinky záření na živou tkáň, převzaté z [13]

## 6 Návrh spoje UV NLOS

### 6.1 Analýza přenosového prostředí

Pro začátek je třeba vědět jak takový NLOS spoj vlastně funguje. Jak již bylo řečeno výše NLOS znamená, že mezi vysílačem a přijímačem není přímá viditelnost. Bližší popis na obrázku 23.  $T_x$  je vysílač,  $R_x$  přijímač,  $l$  vzdálenost mezi nimi.  $\theta_1$  a  $\theta_2$  jsou úhly elevace hlavic, v této práci



obrázek 23: Schéma spoje NLOS, převzaté z [16]

je počítáno s tím, že jsou si tyto dva úhly rovny. Z vysílače vychází paprsek s divergentním úhlem  $\Phi_1$  do oblasti V, kterou pokrývá viditelnost přijímače (field of view), kterou udává úhel  $\Phi_2$ . Pro NLOS komunikaci si můžeme na spojnici  $T_x$  a  $R_x$  představit například kopec.

Pro to, aby bylo možné navrhnout fungující spoj je nutné znát výkonové poměry. Největší dopad na energetiku NLOS spoje má útlum šířením. Díky masivnímu rozptylu na molekulách v atmosféře dosahuje útlum šířením hodnot 80 až 120 dB, což značně omezuje dosah takového spoje. Jako první je uvedena závislost útlumu šířením  $\alpha_{VP}$  na vzdálenosti hlavic pro různé úhly elevace (obrázek 24) spočítané podle vzorce 6.1.

$$\alpha_{VP} = \xi \cdot l^\kappa, \quad (6.1)$$

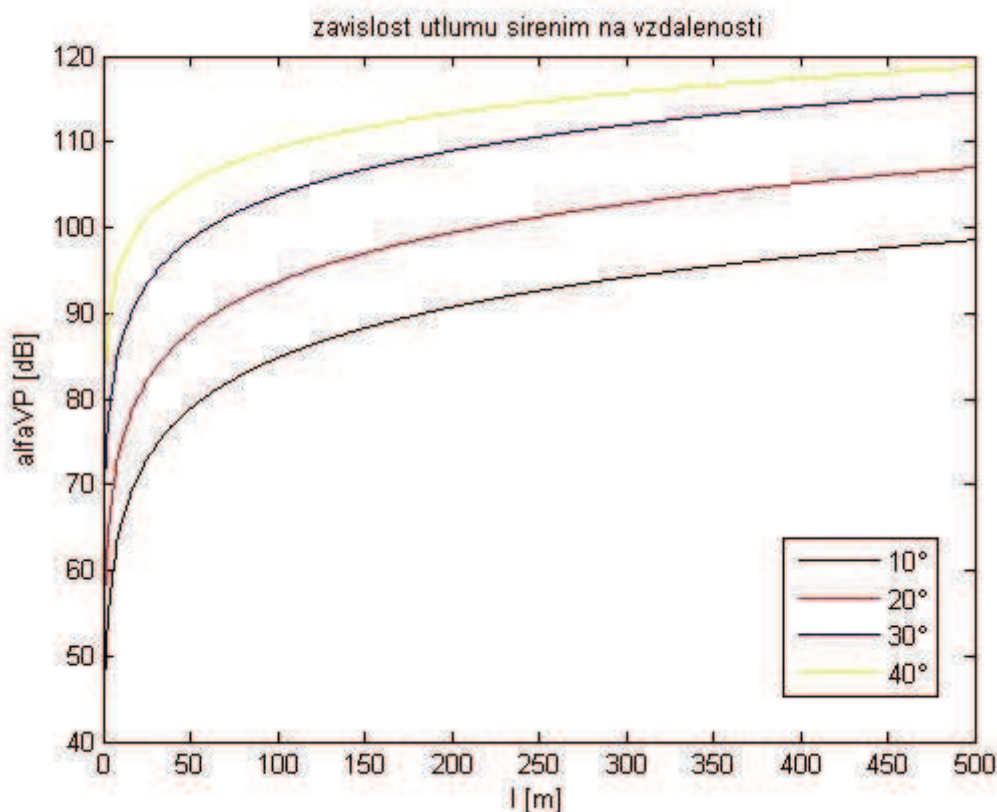
Kde  $\xi$  je tzv. path loss factor,  $l$  vzdálenost hlavic a  $\kappa$  path loss exponent. Hodnoty  $\xi$  a  $\kappa$  se určují pomocí tabulky 4.

$\theta_1, \theta_2$	10°, 10°	20°, 20°	30°, 30°	40°, 40°
$\xi$	3,46E+04	3,43E+05	8,54E+06	1,69E+08
$\kappa$	1,9697	1,9139	1,7219	1,3498

Tabulka 4: Path loss factor a path loss exponent

Závislost je vypočítána pro vzdálenost až 500m, kdy útlum šířením dosahuje 120dB pro úhel elevace 40°.

## Optická komunikace v UV pásmu



obrázek 24: Útlum šířením

Potřebný výkon vysílače se určí pomocí vztahu:

$$P_T = \frac{\varsigma \cdot \alpha_{VP} \cdot R_b \cdot h \cdot \nu}{\eta} , \quad (6.2)$$

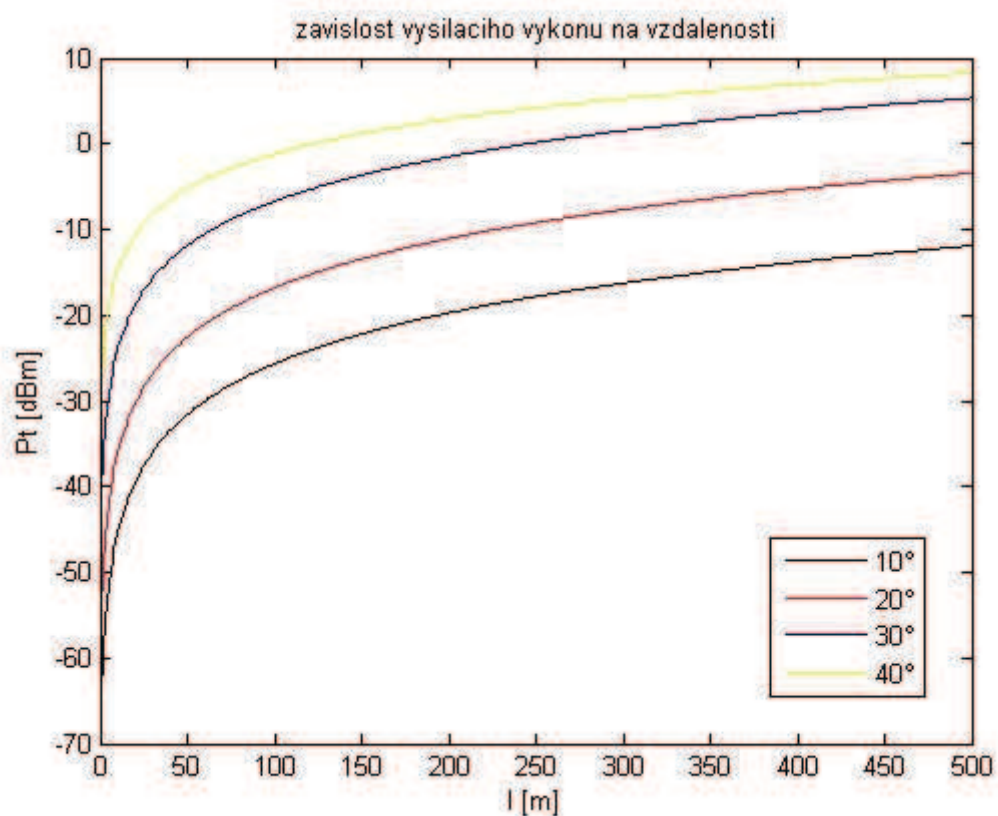
kde  $\varsigma$  je průměrný počet fotonů užitečného signálu, který se určí pomocí vztahu 6.3;  $\alpha_{VP}$  je útlum šířením [-],  $R_b$  bitová rychlost [bit/s],  $h$  Planckova konstanta,  $\nu$  frekvence (2.13) a  $\eta$  je účinnost fotodetektoru [%].

$$BER = \frac{1}{2} \cdot \exp(-\varsigma) , \quad (6.3)$$

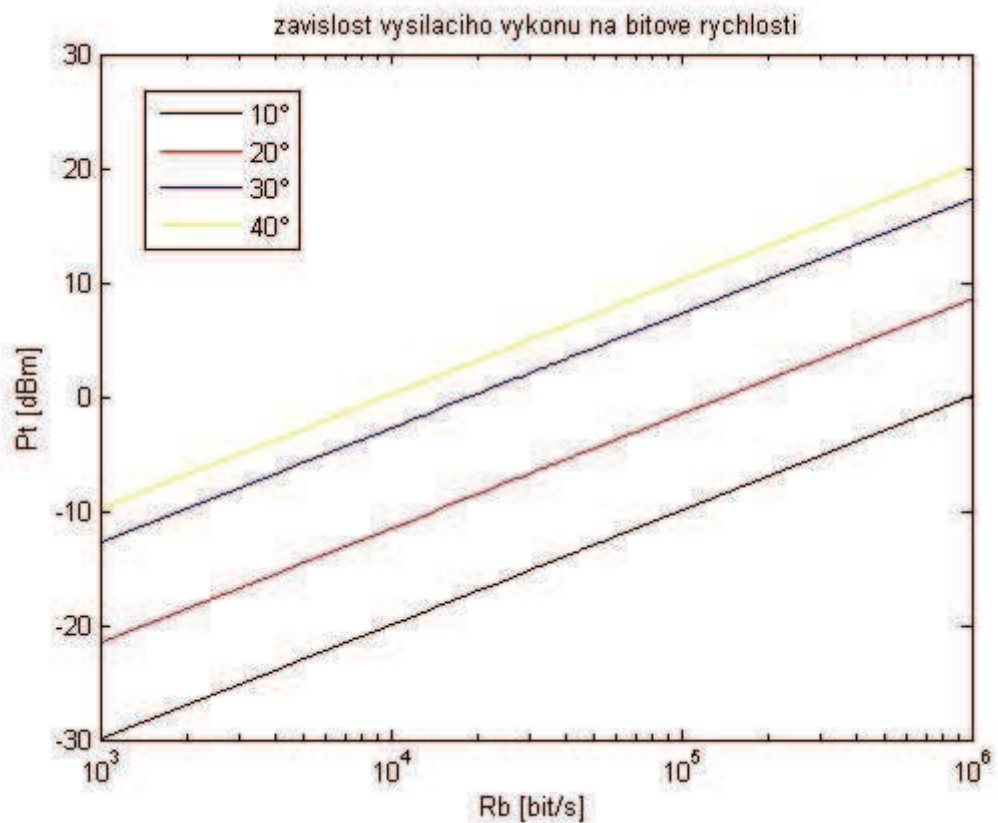
kde BER je chybovost (bit error rate). Následuje graf závislosti vysílacího výkonu, uvedeného v dBm, na vzdálenosti při zachování určitých konstant. Tyto jsou  $\eta = 6\%$ ,  $R_b = 64\text{ kbit/s}$  a  $BER = 10^{-4}$ . Se zvyšující se vzdáleností od vysílače exponenciálně roste i potřebný výkon (obrázek 25). Zvolené konstanty byly určeny tak, aby navrhovaný spoj mohl plnit určité funkce. Bitová rychlost 64 kbit/s a chybovost  $10^{-4}$  jsou dostatečné například pro hlasové spojení či nenáročný datový přenos například v rámci kampusu apod. V praxi se může být výhodné přepínání různých bitových rychlostí pro různé požadavky na přenos. Na obrázku 26 je zobrazen požadavek na výkon vysílače pro různé bitové rychlosti s respektováním výše uvedených konstant a vzdálenost 500 m. Jako doplněk je na obrázku 27 znázorněna opačná závislost, tedy závislost bitové rychlosti na výkonu vysílače. Všechny následující závislosti respektují zde uvedené konstanty.



## Optická komunikace v UV pásmu



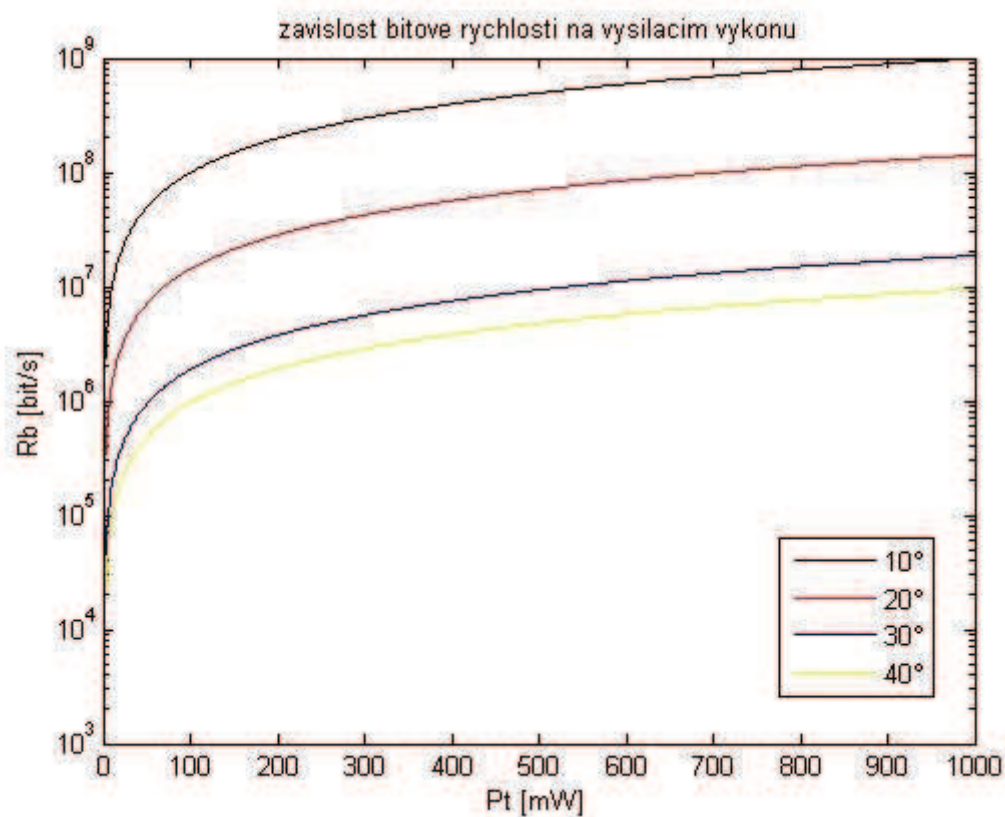
obrázek 25: Vysílací výkon v závislosti na vzdálenosti



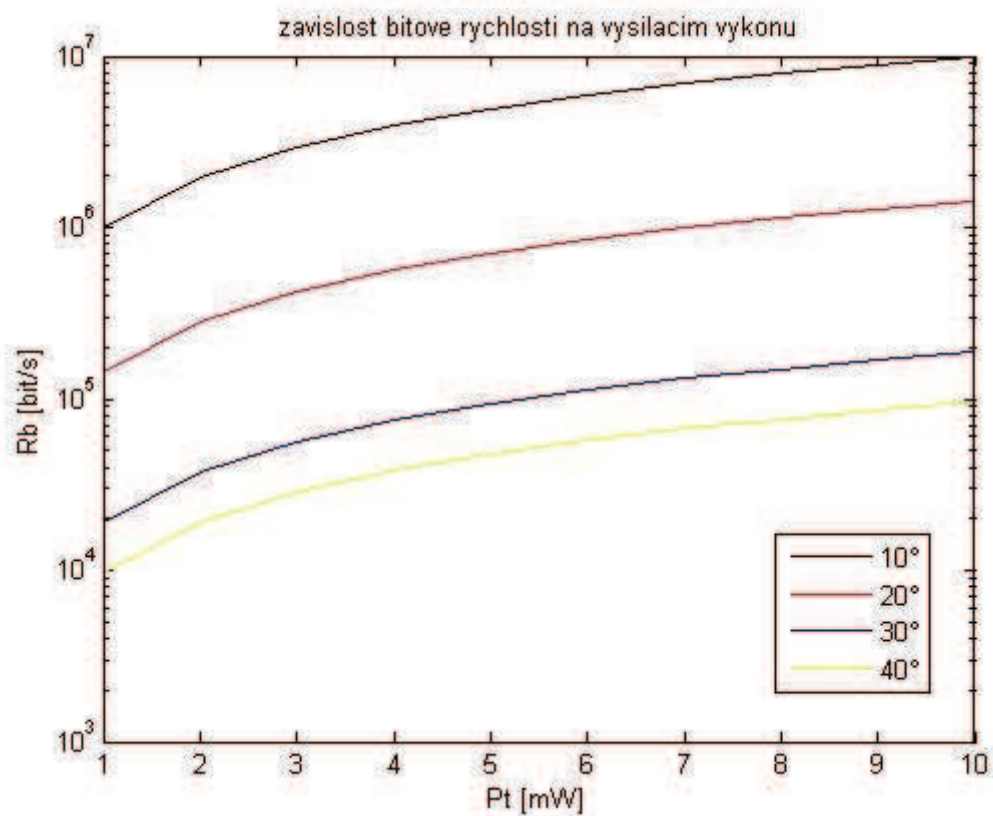
obrázek 26: Vysílací výkon v závislosti na bitové rychlosti



## Optická komunikace v UV pásmu



obrázek 27: Bitová rychlost v závislosti na vysílacím výkonu



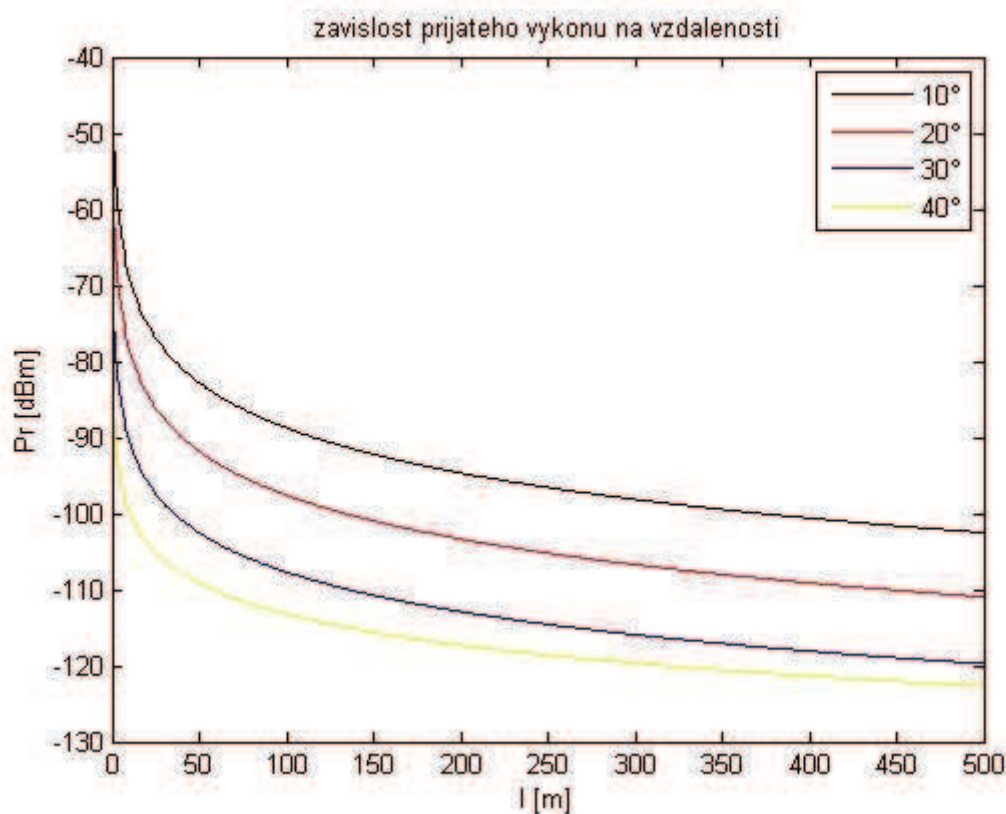
obrázek 28: přiblížení obrázku 27 pro výkony od 1mW do 10mW

## Optická komunikace v UV pásmu

Dále je třeba analyzovat závislost výkonu dopadajícího na aktivní plochu přijímače. Přijímaný výkon se spočítá podle vztahu:

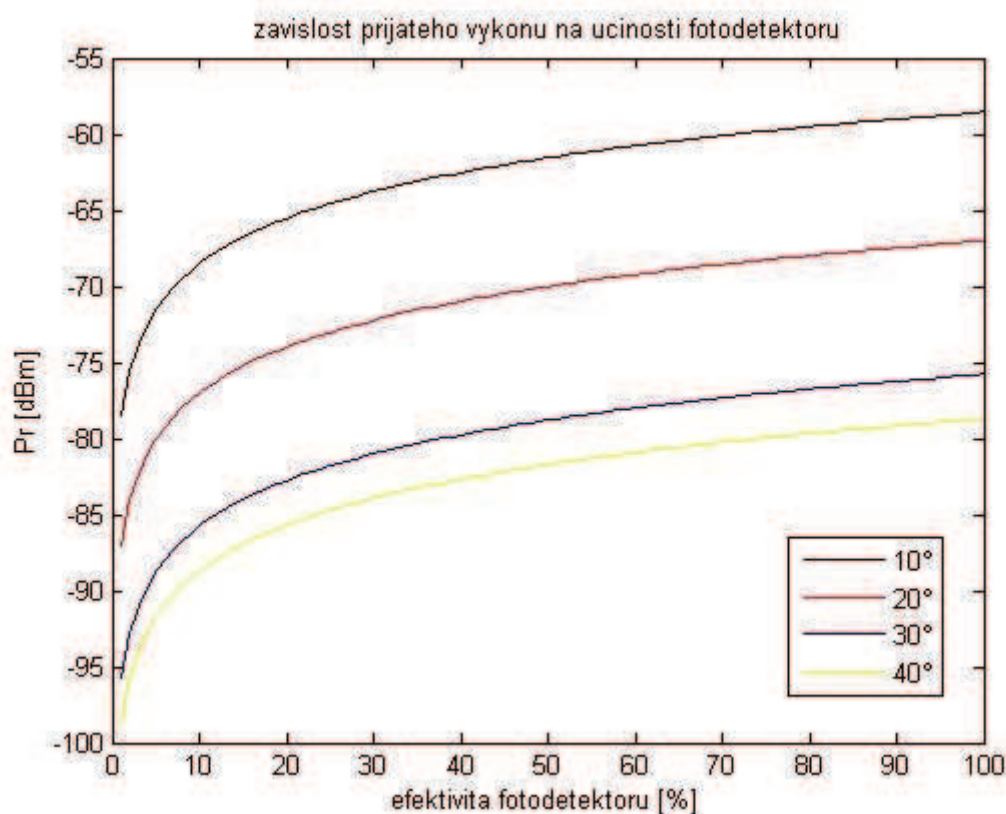
$$P_R = \frac{\eta \cdot P_T}{\alpha_{VP}} \quad (6.4)$$

Jako první je na obrázku 28 uvedena závislost přijímaného výkonu na vzdálenosti od vysílače. Se vzdáleností přijatý výkon exponenciálně klesá. Kromě zvýšení výkonu vysílače, což by mohlo přinést zdravotní rizika je možné dosáhnout lepších výkonových poměrů na straně přijímače zařazením fotonásobiče. Na obrázku 29 je uvedena závislost přijatého výkonu na účinnosti fotonásobiče, ta se běžně pohybuje okolo 30%. S rostoucí účinností exponenciálně roste úroveň přijatého výkonu [16][17][18].



obrázek 29: Přijatý výkon v závislosti na vzdálenosti

## Optická komunikace v UV pásmu



obrázek 30: Přijatý výkon v závislosti na efektivitě fotodetektoru

## 6.2 Konkrétní návrh

Zcela dominantní faktor v souvislosti s výkonovými ztrátami ve svazku je útlum šířením (6.1). Celkový útlum svazku, včetně útlumu na molekulách a aerosolech se spočítá takto:

$$\alpha_{all} = \xi \cdot l^{\kappa} \cdot e^{\beta \cdot l}, \quad (6.5)$$

kde  $\beta$  je koeficient útlumu [ $\text{km}^{-1}$ ]. Avšak tento vliv útlumu na molekulách a aerosolech se uplatní až při komunikaci na vzdálenosti větší než jeden kilometr. Vzhledem k tomu, že tato práce se zabývá spoji na krátkou vzdálenost je vztah (6.1) zcela postačující.

Útlumy na průzorech vysílače a přijímače jsou pro jednoduchost stanoveny na 3dB, což odpovídá v praxi dosahovaným hodnotám.

Zisk na přijímací fotodiodě, případně fotonásobiči je dán vztahem

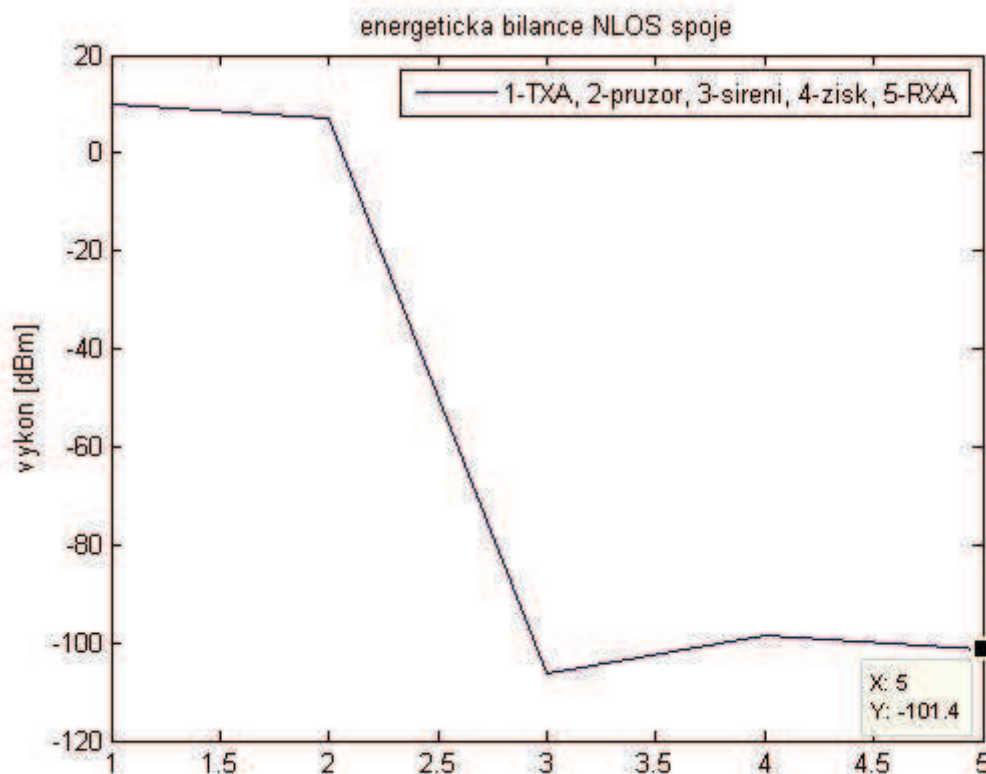
$$g_{POS} = (20 \cdot \log(\frac{D_{RXA}}{D_{TXA}})) + 3, \quad (6.6)$$

kde  $D_{RXA}$  je průměr přijímací čočky [m],  $D_{TXA}$  je průměr vysílací čočky [m]. V praxi je průměr vysílací čočky 2-3 cm, přijímací aparatura je větší, alespoň 5cm.

V příloze je uveden zdrojový kód energetika.m, kterým byla vytvořena následující energetická bilance. Je zde uvažováno spojení s úhly elevace  $40^\circ$ , na vzdálenost 200m, s vysílacím

## Optická komunikace v UV pásmu

výkonem 10mW, průměrem přijímací apertury 5cm a průměrem vysílací apertury 2cm.



obrázek 31: Příklad energetické bilance optického spoje

Jak je vidět z obrázku 31, přijatý výkon je zde -101,4dBm což je 72,789pW což je velmi nízká a těžce detekovatelná hodnota. Je však třeba si uvědomit, že pro použitou vlnovou délku 200nm se u zemského povrchu nevyskytuje **žádné záření pozadí** a tedy i přijatý signál je čistý, neovlivněný žádným šumem pozadí. Jediné, čím je tento spoj limitovaný je kvantový šum použité elektroniky, ten naneštěstí odstranit nelze. Takovíto spoj by teoreticky měl dosahovat bitové rychlosti 328kbps. To je zcela postačující pro hlasové spojení dvou stanic a nenáročný přenos dat mezi nimi [6][16][17][18].

Naprostá většina LED modulů pro ultrafialovou oblast se vyrábí pro vlnové délky až kolem 350nm, pro zde uvažovaných 200nm není nabídka téměř žádná. Jako konkrétní zdroj se může použít model 3W-180-200nm (8358) od společnosti Chinese Department Store [33]. Tato dioda má pracovní proud 700mA, nicméně výkon 3W což je poněkud naddimenzované. Pro dodání výkonů nutných pro komunikaci by postačovalo mnohem méně energie, kterou by např. běžná baterie od mobilního telefonu byla schopna dodat. Navíc v dnešní době rozvoje alternativních zdrojů energie jako jsou fotovoltaická trička, nebo využívání piezoelektrického jevu při pohybu těla by neměl nastat žádný problém s dodávkou potřebného množství energie. Dále, pro výzkum těchto spojů v laboratorních podmínkách je vhodnější laser [34].

## 7 Závěr

V této bakalářské práci jsou popsány základní pohledy na oblast optiky a různé optické jevy, které tyto oblasti popisují. Je pojednáno o zdrojích a přijímačích optického výkonu. Nachází se zde také detailní popis atmosférického přenosového prostředí, jeho vlivu na optické svazky a jevů, které zde mohou vznikat. Další kapitolou je vliv ultrafialového záření na živé organismy. Nakonec je rozebrán návrh atmosférického spoje NLOS včetně simulací výkonových poměrů jak na vysílači tak i na přijímači. UV spojení je vhodné především tam, kde nelze zajistit přímou viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem. Tedy například v rámci kampusu jako doplnění WiFi. Další možností je propojení dvou stanic (telefonů) pro přenos dat na principu technologie Bluetooth, ale například i pro volání zdarma do vzdálenosti až 500m, což by bylo postačující pro firmy, které sídlí v rozlehlých areálech.

# Literatura

- [1] SALEH, B.E.A., TEICH, M.C. Základy fotoniky. Praha" MATFYZPRESS Praha, 1994. ISBN 80-85863-00-6
- [2] WILFERT, O. Přednáškové prezentace k předmětu MKVE. [online] [cit 2011.11.27]. Dostupný z WWW: <https://www.vutbr.cz/elearning/course/view.php?id=112706>
- [3] WILFERT, O. Fotonika a optické komunikace. Brno: FEKT VUT Brno.
- [4] WILFERT, O. Optoelektronika. Brno: FEKT VUT Brno, 2002. ISBN 80-214-1942-3
- [5] VITÁSEK, J. Měření rozložení optické intenzity ve vzdálené zóně. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 49 s. Vedoucí diplomové práce prof. ing. Otakar Wilfert, CSc.
- [6] DORDOVÁ, L. Metoda stanovení charakteristik atmosférického přenosového prostředí v optické oblasti spektra. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 137 s. Vedoucí disertační práce prof. ing. Otakar Wilfert, CSc.
- [7] Thorlabs [online].  $\Phi 1$ "Nd:YAG Laser Line Mirrors [cit 2011.12.4]. Dostupný z WWW: [http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=3793](http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3793)
- [8] Thorlabs [online]. Excimer Laser Mirrors: ArF, KrF, and XeF [cit. 2011.12.4]. Dostupný z WWW: [http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup\\_ID=805](http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=805)
- [9] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. Fyzika. Brno: Nakladatelství VUTUM. ISBN 80-214-1868-0
- [10] ZUEV, V.E. Laser Beams in the Atmosphere. New York: Consultants Bureau, 1982, ISBN 8-306-10967-0
- [11] Practical Physics [online]. Avogadro's number and the mass of an air molecule [cit. 2011.12.25]. Dostupný z WWW: [http://www.practicalphysics.org/go/Guidance\\_99.html?topic\\_id=4&guidance\\_id=1](http://www.practicalphysics.org/go/Guidance_99.html?topic_id=4&guidance_id=1)
- [12] LUCAS, R., MCMICHAEL, T., SMITH, W., ATMSTRONG, B., Solar ultraviolet radiation. Geneva: World health organization, 2006. ISBN 92-4-159440-3
- [13] GARCÍA, S.I. Basis of Biomedical Optics. Santander: Universidad de Cantabria, 2011.
- [14] MORIARTY, D., HOMBS, B., System design of tactical communications with solar blind ultraviolet non line-of-sight systems, In Military Communications Conference MILCOM 2009, p. 1-7.
- [15] WANG JULIANG, LUO TING, DAI MENG, TIAN YANFANG, UV NLOS Communication atmospheric channel model and its performance analysis, In Computer Science and Information Engineering 2009 WRI World Congress, 2009, p. 85-88.
- [16] QUNFENG HE, ZHENGYUAN XU, SADLER, B.M., Non-line-of-sight Serial Relayed Link for Optical Wireless Communications, The 2010 Military Communications Conference



## Optická komunikace v UV pásmu

- [17] Q. HE, Z. XU, and B.M. Sadler, "Performance of non-line-of-sight LED-based ultraviolet communication receivers," *Opt. Express*, May 2010 (in press)
- [18] G. Chen, Z. Xu, H. Ding, and B.M. Sadler, "Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications," *Opt. Express* **17**(5), 3929-3940 (2009)
- [19] BRZOBOHATÝ, J., MUSIL, V., BAJER, A., BOUŠEK, J., PROKOP, R. Elektronické součástky. Brno: FEKT VUT Brno
- [20] Projekt VEGA [online]. Možné přístupy k teorii optiky [cit. 2011.11.15]. Dostupný z WWW: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/node56.html>
- [21] Wikipedia [online]. Lens (optics) [cit. 2011.11.14]. Dostupný z WWW: [http://en.wikipedia.org/wiki/Lens\\_\(optics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Lens_(optics))
- [22] Wikipedia [online]. Zrcadlo [cit. 2011.11.14]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zrcadlo>
- [23] Физика и физичари [online]. Физика у кући: Огледало [cit. 2011.11.14]. Dostupný z WWW: [http://fizikasmartysocks.blogspot.com/2010/09/blog-post\\_28.html](http://fizikasmartysocks.blogspot.com/2010/09/blog-post_28.html)
- [24] Wikipedia [online]. Beam splitter [cit. 2011.11.14]. Dostupný z WWW: [http://es.wikipedia.org/wiki/Beam\\_splitter](http://es.wikipedia.org/wiki/Beam_splitter)
- [25] Wikipedia [online]. Optický hranol [cit. 2011.11.14]. Dostupný z WWW: [http://sk.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%BD\\_hranol](http://sk.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%BD_hranol)
- [26] o škole [online]. Odraz a lom svetla [cit. 2011.11.23] Dostupný z WWW: [http://www.oskole.sk/?id\\_cat=3&clanok=6393](http://www.oskole.sk/?id_cat=3&clanok=6393)
- [27] Wikipedia [online]. Интерферометр Майкельсона [cit. 2011.11.15]. Dostupný z WWW: [http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80\\_%D0%9C%D0%B0%D0%B9%D0%BA%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80_%D0%9C%D0%B0%D0%B9%D0%BA%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0)
- [28] Wikipedia [online]. Фотоэффект [cit. 2011.11.27]. Dostupný z WWW: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82>
- [29] Wikipedia [online]. Light-emitting diode [cit. 2011.11.30]. Dostupný z WWW: [http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting\\_diode](http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode)
- [30] Wikipedia [online]. Laser [cit. 2011.12.3]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [31] Wikipedia [online]. تجربة شقي يونغ [cit. 2012.05.24]. Dostupný z WWW: [http://ar.wikipedia.org/wiki/%D8%AA%D8%AC%D8%B1%D8%A8%D8%A9\\_%D8%B4%D9%82%D9%8A\\_%D9%8A%D9%88%D9%86%D8%BA](http://ar.wikipedia.org/wiki/%D8%AA%D8%AC%D8%B1%D8%A8%D8%A9_%D8%B4%D9%82%D9%8A_%D9%8A%D9%88%D9%86%D8%BA)
- [32] gcsescience.com [online]. Waves [cit. 2011.12.25]. Dostupný z WWW: <http://www.gcsescience.com/pwav44.htm>
- [33] Chinese Department Store [online]. 3W-180-200nm [cit. 2012.05.23]. Dostupný z WWW: [http://www.chinesedepartmentstore.com.cn/osc/product\\_info.php/cPath/360/products\\_id/8358](http://www.chinesedepartmentstore.com.cn/osc/product_info.php/cPath/360/products_id/8358)
- [34] LASER 2000 [online]. Deep UV Lasers 224 and 248 nm [cit. 2012.05.23]. Dostupný z WWW: [http://www.laser2000.fr/fileadmin/Produktdaten/PSY/Datenblaetter/PSY\\_DeepUV-Laser\\_En.pdf](http://www.laser2000.fr/fileadmin/Produktdaten/PSY/Datenblaetter/PSY_DeepUV-Laser_En.pdf)

## Seznam symbolů

$\alpha$	parametr dimenze
$\alpha_a$	koeficient absorpce na aerosolech
$\alpha_m$	ztráta zrcadla
$\alpha_{mo}$	koeficient absorpce na molekulách
$\alpha_r$	celkový koeficient ztrát
$\alpha_s$	koeficient zeslabení
$\beta$	celkový koeficient rozptylu
$\beta_a$	koeficient rozptylu na aerosolech
$\beta_m$	koeficient rozptylu na molekulách
$c$	rychlost světla v daném prostředí
$c_0$	rychlost světla ve vakuu
$E$	energie
$\epsilon_0$	permitivita vakua
$\Phi$	hustota fotonového toku
$\Phi_s$	saturační hustota fotonového toku
$\varphi$	fázový rozdíl
$g$	funkce tvaru spektrální čáry přechodu
$\gamma$	koeficient extince
$\gamma_0$	koeficient zesílení malého signálu
$\gamma_{POS}$	zisk na přijímací optické soustavě
$\gamma_s$	saturovaný koeficient zesílení
$h$	Planckova konstanta
$\hbar$	redukovaná Planckova konstanta
$\chi$	komplexní susceptibilita
$\chi'$	reálná část komplexní susceptibility
$\chi''$	imaginární část komplexní susceptibility
$I$	optická intenzita
IR	infra red (infra červená)
$j$	imaginární jednotka
$k$	vlnové číslo
$k_0$	vlnové číslo ve vakuu
LED	light emitting diode
LOS	line of sight (přímá viditelnost)



## Optická komunikace v UV pásmu

$\lambda$	vlnová délka
M	počet molekul na jednotku objemu
$\mu_0$	permeabilita vakua
N	oblast s elektronovou vodivostí
NLOS	non line of sight (nepřímá viditelnost)
n	index lomu
$n_0$	index lomu neabsorbujícího prostředí
$\nu$	kvantová frekvence
$\nabla$	laplaceův operátor
$\omega$	úhlová rychlost fázoru
P	oblast s děrovou vodivostí
PIN	dioda s oblastí intrinzického polovodiče mezi oblastmi P a N
$\vec{p}$	hybnost fotonu
R	odrazivost zrcadla
$\sigma$	efektivní průřez přechodu
t	čas
$t_{sp}$	doba spontánního přechodu
$\tau$	propustnost atmosféry
$\Theta_0$	úhel divergence
UV	ultra violet (ultra fialový)
$U(r)$	komplexní amplituda v poloze r
u	vlnová funkce
V	meteorologická viditelnost
$w_0$	pološířka svazku v krčku
$v_g$	grupová rychlost
$w_z$	pološířka svazku
z	vzdálenost od počátku
$z_0$	Rayleighova vzdálenost
3D	trojrozměrný prostor

# Přílohy

## A Funkce pro výpočet energetické bilance UV NLOS spoje

```
function [Pr] = energetika(el,l,Pt,Drxa,Dtxa)
% el - uhel elevace [°]; l - vzdalenost vysilac-prijimac [m]; Pt - vysilaci
% vykon[mW]; Drxa - prumer prijimaci cocky [m]; Dtxa - prumer vysilaci
% cocky [m];

alfaTXA = 3;
ksi = [3.46e4 3.43e5 8.54e6 1.69e8]; % path loss factor
kapa = [1.9697 1.9139 1.7219 1.3498]; % path loss exponent
alfaRXA = 3;

if el == 10
    ksy = ksi(1);
    eks = kapa(1);
elseif el == 20
    ksy = ksi(2);
    eks = kapa(2);
elseif el == 30
    ksy = ksi(3);
    eks = kapa(3);
elseif el == 40
    ksy = ksi(4);
    eks = kapa(4);
else disp('Tato hodnota "el" neni podporovana.');
```

end

alfaVP = 10\*log10(ksy\*(l^(eks)));

## Optická komunikace v UV pásmu

```
PtdB = 10*log10(Pt);  
zita = 20*log10(Drxa/Dtxa);  
  
bod2 = PtdB-alfaTXA;  
bod3 = bod2-alfaVP;  
bod4 = bod3+zita;  
bod5 = bod4-alfaRXA;  
  
Pr = 10^(bod5/10);  
  
figure(1);  
x = 1:5;  
y = [PtdB bod2 bod3 bod4 bod5];  
plot(x,y);  
title('energeticka bilance NLOS spoje');  
ylabel('vykon [dBm]');  
legend('1-TXA, 2-pruzor, 3-sireni, 4-zisk, 5-RXA');
```

## B Skript pro vykreslení grafů závislosti útlumů

```
clc;  
clear all;  
close all;  
  
lambda = 100e-9:1e-9:500e-9;  
  
%% utlum na aerosolech  
  
V1 = 0.75;  
V2 = 3;  
V3 = 20;  
V4 = 50;  
y11 = zeros(1,length(lambda));
```

## Optická komunikace v UV pásmu

```
y12 = zeros(1,length(lambda));
y13 = zeros(1,length(lambda));
y14 = zeros(1,length(lambda));

for a = 1:length(lambda)
    betaA1 = ((3.912/V1)*((lambda(a)/550)^(V1-0.5)))/0.23;
    y11(a) = betaA1;
end

for b = 1:length(lambda)
    betaA2 = ((3.912/V2)*((lambda(b)/550)^(0.16*V2+0.34)))/0.23;
    y12(b) = betaA2;
end

for c = 1:length(lambda)
    betaA3 = ((3.912/V3)*((lambda(c)/550)^1.3))/0.23;
    y13(c) = betaA3;
end

for d = 1:length(lambda)
    betaA4 = ((3.912/V4)*((lambda(d)/550)^1.6))/0.23;
    y14(d) = betaA4;
end

lambdam = 200e-9;
Vm = 0.1:50;
y15 = zeros(1,length(Vm));

if Vm > 50
    q = 1.6;
elseif 6 < Vm < 50
    q = 1.3;
elseif 1 < Vm < 6
    q = (0.16*V)+0.34;
```

## Optická komunikace v UV pásmu

```
elseif 0.5 < Vm < 1
    q = Vm-0.5;
elseif Vm < 0.5
    q = 0;
end

for aa = 1:length(Vm)
    betaA5 = ((3.912/Vm(aa))*((lambdam/550)^q))/0.23;
    y15(aa) = betaA5;
end

figure(1);
semilogy(lambda,y11,'k');
hold on;
semilogy(lambda,y12,'r');
semilogy(lambda,y13,'b');
semilogy(lambda,y14,'y');
hold off;
title('zavislost utlumu na aerosolech na vlnove delce');
xlabel('lambda [m]');
ylabel('betaM [dB/km]');
legend('750m','3km','20','50');

figure(2);
semilogy(Vm,y15);
title('zavislost utlumu na aerosolech na meteorologicke viditelnosti');
xlabel('meteorologicka viditelnost [km]');
ylabel('betaM [dB/km]');

%% utlum na molekulach

y3 = zeros(1,length(lambda));

for e = 1:length(lambda)
```

## Optická komunikace v UV pásmu

```
betaM = (4.0958/((3.5969e30)*(lambda(e)^4)))/0.23;  
y3(e) = betaM;  
end  
  
figure(3);  
semilogy(lambda,y3);  
title('zavislost utlumu na molekulach na vlnove delce');  
xlabel('lambda [m]');  
ylabel('betaM [dB/km]');
```

## C Skript pro vykreslení výkonových poměrů ve spoji UV NLOS

```
clc;  
close all;  
clear all;  
  
%% popis  
  
% V oddílech konstanty a pomocné výpočty jsou hodnoty potřebné pro výpočet  
% modelu. U každého druhu modelu je rozdělen vždy jeden z těchto parametrů,  
% ostatní jsou rovny uvedeným hodnotám.  
  
%% konstanty  
  
h = 6.626e-34; % Planckova konstanta; J*s^-1  
c0 = 299792458; % rychlost světla ve vakuu; ms^-1  
ksi = [3.46e4 3.43e5 8.54e6 1.69e8]; % path loss factor  
ex = [1.9697 1.9139 1.7219 1.3498]; % path loss exponent  
lambda = 200e-9; % vlnová délka; m  
l = 500; % vzdálenost hlavic; m  
nyy = 0.06; % účinnost fotodetektoru  
Rb = 64e3; % bitová rychlost přenosu; bit/s  
BER = 1e-4; % chybovost
```

## Optická komunikace v UV pásmu

%% pomocne vypocty

```
ny = c0/lambda;          % frekvence
alfaVP = ksi(4)*(l^ex(4)); % utlum sirenim
sig = (log10(2*BER))/(-0.4343); % average of signal photon count
Pt = (sig*alfaVP*Rb*h*ny)/nyy; % vysilaci vykon
Pr = (nyy*Pt)/(ksi(4)*(l^ex(4))); % prijaty vykon
Rbmmmm = (10*nyy)/(sig*ksi(4)*(200^ex(4))*h*ny);
```

%% zavislost channel path loss na vzdalenosti

```
y11 = zeros(1,500);
y12 = zeros(1,500);
y13 = zeros(1,500);
y14 = zeros(1,500);
```

```
for lm = 1:500
    alfaVPm1 = 10*log10(ksi(1)*(lm^ex(1)));
    y11(lm) = alfaVPm1;
end
```

```
for lm = 1:500
    alfaVPm2 = 10*log10(ksi(2)*(lm^ex(2)));
    y12(lm) = alfaVPm2;
end
```

```
for lm = 1:500
    alfaVPm3 = 10*log10(ksi(3)*(lm^ex(3)));
    y13(lm) = alfaVPm3;
end
```

```
for lm = 1:500
    alfaVPm4 = 10*log10(ksi(4)*(lm^ex(4)));
```

## Optická komunikace v UV pásmu

```
y14(lm) = alfaVPm4;
end

figure(1)
x1 = 1:500;
plot(x1,y11,'k');
hold on;
plot(x1,y12,'r');
plot(x1,y13,'b');
plot(x1,y14,'y');
hold off;
title('zavislost utlumu sirenim na vzdalenosti');
xlabel('l [m]');
ylabel('alfaVP [dB]');
legend('10°','20°','30°','40°');

%% zavislost vysilaciho vykonu na vzdalenosti

y21 = zeros(1,500);
y22 = zeros(1,500);
y23 = zeros(1,500);
y24 = zeros(1,500);

for lm = 1:500
    Ptm1 = 10*log10((sig*ksi(1)*(lm^ex(1))*Rb*h*ny)/nyy);
    y21(lm) = Ptm1;
end

for lm = 1:500
    Ptm2 = 10*log10((sig*ksi(2)*(lm^ex(2))*Rb*h*ny)/nyy);
    y22(lm) = Ptm2;
end

for lm = 1:500
```



## Optická komunikace v UV pásmu

```
Ptm3 = 10*log10((sig*ksi(3)*(lm^ex(3))*Rb*h*ny)/nyy);
y23(lm) = Ptm3;
end

for lm = 1:500
    Ptm4 = 10*log10((sig*ksi(4)*(lm^ex(4))*Rb*h*ny)/nyy);
    y24(lm) = Ptm4;
end

figure(2);
plot(x1,y21,'k');
hold on;
plot(x1,y22,'r');
plot(x1,y23,'b');
plot(x1,y24,'y');
hold off;
title('zavislost vysilaciho vykonu na vzdalenosti');
xlabel('l [m]');
ylabel('Pt [dBm]');
legend('10°','20°','30°','40°');

%% zavislost vysilaciho vykonu na bitove rychlosti

Rbm = 1e3:1e3:1e6;
y31 = (1:length(Rbm));
y32 = (1:length(Rbm));
y33 = (1:length(Rbm));
y34 = (1:length(Rbm));

for a = 1:length(Rbm)
    Ptmml = 10*log10((sig*ksi(1)*(l^ex(1))*Rbm(a)*h*ny)/nyy);
    y31(a) = Ptmml;
end
```

## Optická komunikace v UV pásmu

```
for a = 1:length(Rbm)
    Ptmm2 = 10*log10((sig*ksi(2)*(l^ex(2))*Rbm(a)*h*ny)/nyy);
    y32(a) = Ptmm2;
end
```

```
for a = 1:length(Rbm)
    Ptmm3 = 10*log10((sig*ksi(3)*(l^ex(3))*Rbm(a)*h*ny)/nyy);
    y33(a) = Ptmm3;
end
```

```
for a = 1:length(Rbm)
    Ptmm4 = 10*log10((sig*ksi(4)*(l^ex(4))*Rbm(a)*h*ny)/nyy);
    y34(a) = Ptmm4;
end
```

```
figure(3);
semilogx(Rbm,y31,'k');
hold on;
semilogx(Rbm,y32,'r');
semilogx(Rbm,y33,'b');
semilogx(Rbm,y34,'y');
hold off;
title('zavislost vysilaciho vykonu na bitove rychlosti');
xlabel('Rb [bit/s]');
ylabel('Pt [dBm]');
legend('10°','20°','30°','40°');
```

%% zavislost prijateho vykonu na ucinosti fotodetektoru

```
Ptm = 100;
y41 = zeros(1,100);
y42 = zeros(1,100);
y43 = zeros(1,100);
y44 = zeros(1,100);
```

## Optická komunikace v UV pásmu

```
for nyym = 1:100
    Prm = 10*log10((nyym*Ptm)/(ksi(1)*(l^ex(1))));
    y41(nyym) = Prm;
end

for nyym = 1:100
    Prm = 10*log10((nyym*Ptm)/(ksi(2)*(l^ex(2))));
    y42(nyym) = Prm;
end

for nyym = 1:100
    Prm = 10*log10((nyym*Ptm)/(ksi(3)*(l^ex(3))));
    y43(nyym) = Prm;
end

for nyym = 1:100
    Prm = 10*log10((nyym*Ptm)/(ksi(4)*(l^ex(4))));
    y44(nyym) = Prm;
end

figure(4);
x4 = 1:100;
plot(x4,y41,'k');
hold on;
plot(x4,y42,'r');
plot(x4,y43,'b');
plot(x4,y44,'y');
hold off;
title('zavislost prijateho vykonu na ucinosti fotodetektoru');
xlabel('efektivita fotodetektoru [%]');
ylabel('Pr [dBm]');
legend('10°','20°','30°','40°');
```

## Optická komunikace v UV pásmu

%% závislost prijateho vykonu na vzdalenosti

```
y51 = zeros(1,500);
```

```
y52 = zeros(1,500);
```

```
y53 = zeros(1,500);
```

```
y54 = zeros(1,500);
```

```
for lm = 1:500
```

```
    Prmm = 10*log10((nyy*Pt)/(ksi(1)*(lm^ex(1))));
```

```
    y51(lm) = Prmm;
```

```
end
```

```
for lm = 1:500
```

```
    Prmm = 10*log10((nyy*Pt)/(ksi(2)*(lm^ex(2))));
```

```
    y52(lm) = Prmm;
```

```
end
```

```
for lm = 1:500
```

```
    Prmm = 10*log10((nyy*Pt)/(ksi(3)*(lm^ex(3))));
```

```
    y53(lm) = Prmm;
```

```
end
```

```
for lm = 1:500
```

```
    Prmm = 10*log10((nyy*Pt)/(ksi(4)*(lm^ex(4))));
```

```
    y54(lm) = Prmm;
```

```
end
```

```
figure(5);
```

```
plot(x1,y51,'k');
```

```
hold on;
```

```
plot(x1,y52,'r');
```

```
plot(x1,y53,'b');
```

```
plot(x1,y54,'y');
```

```
hold off;
```

## Optická komunikace v UV pásmu

```
title('zavislost prijateho vykonu na vzdalenosti');
xlabel('l [m]');
ylabel('Pr [dBm]');
legend('10°','20°','30°','40°');

%% zavislost bitove rychlosti na vysilacim vykonu

y61 = zeros(1,10);
y62 = zeros(1,10);
y63 = zeros(1,10);
y64 = zeros(1,10);

for Ptmmm1 = 1:10
    Rbmm1 = (Ptmmm1*nyy)/(sig*ksi(1)*(l^ex(1))*h*ny);
    y61(Ptmmm1) = Rbmm1;
end

for Ptmmm2 = 1:10
    Rbmm2 = (Ptmmm2*nyy)/(sig*ksi(2)*(l^ex(2))*h*ny);
    y62(Ptmmm2) = Rbmm2;
end

for Ptmmm3 = 1:10
    Rbmm3 = (Ptmmm3*nyy)/(sig*ksi(3)*(l^ex(3))*h*ny);
    y63(Ptmmm3) = Rbmm3;
end

for Ptmmm4 = 1:10
    Rbmm4 = (Ptmmm4*nyy)/(sig*ksi(4)*(l^ex(4))*h*ny);
    y64(Ptmmm4) = Rbmm4;
end

x6 = 1:10;
figure(6);
```

## Optická komunikace v UV pásmu

```
semilogy(x6,y61,'k');  
hold on;  
semilogy(x6,y62,'r');  
semilogy(x6,y63,'b');  
semilogy(x6,y64,'y');  
hold off;  
title('zavislost bitove rychlosti na vysilacim vykonu');  
xlabel('Pt [mW]');  
ylabel('Rb [bit/s]');  
legend('10°','20°','30°','40°');
```